

UNIVERSIDAD DE CUENCA



FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL FLUJO A TRAVÉS DE UN
VERTEDERO EN ABANICO Y SU SUBSECUENTE CUENCO DISIPADOR
MEDIANTE UN MODELO MATEMATICO DE FLUJO EN TRES DIMENSIONES.**

TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN
DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

DIRECTOR:

ING. FELIPE EDUARDO CISNEROS ESPINOSA, Ph.D

AUTORES:

DIEGO FERNANDO PATIÑO FERNANDEZ

DIEGO MARTÍN VINTIMILLA VINTIMILLA

CUENCA – ECUADOR
OCTUBRE - 2015



RESUMEN

Con el propósito de establecer el patrón de flujo en algunas obras correspondientes al Proyecto PACALORI, y para validar los resultados que fueran obtenidos mediante el modelo físico de escala reducida que fuera ejecutado por el Programa para el Manejo del Agua y del Suelo (PROMAS) y el Laboratorio de Hidráulica y Dinámica de Fluidos LH&DF de la Universidad de Cuenca, a través del presente estudio, se ha implementado, a las obras: Vertedero de Abanico y su Cuenco disipador, el software de modelación numérica tridimensional FLOW-3D que está basado en la aproximación de un volumen de control mediante una malla tridimensional para cálculo del flujo mediante la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes utilizando un modelo de turbulencia. Con este estudio se reportarán resultados de simulación numérica que son contrastados y analizados con los resultados cualitativos y cuantitativos que fueran obtenidos por el estudio en el modelo físico de escala reducida. A través del análisis y discusión de los resultados, se muestra que la modelización numérica tridimensional utilizando FLOW-3D, constituye un soporte complementario a la modelación física tanto para el estudio del desempeño hidráulico y procesos de flujo en estructuras hidráulicas así como para verificar su correcto diseño. Finalmente, se emitirán recomendaciones para dar paso a la ejecución de futuros estudios que permitan contrastar y analizar el desempeño de otros modelos de simulación numérica como herramienta para el diseño y análisis del funcionamiento de estructuras hidráulicas y procesos de flujo en proyectos de Ingeniería Civil.

Palabras clave: Modelación Numérica, FLOW-3D, Modelo físico de escala reducida.



ABSTRACT

In order to establish the flow pattern in the some facilities of the PACALORI Project, and to validate the results obtained through the small-scale physical model executed by the Water Management and Soil Research Program (PROMAS) and the Hydraulics and Fluid Dynamics Laboratory at University of Cuenca, through this study, the three-dimensional numerical modeling software FLOW-3D has been implemented to the facilities: Fan spillway and its subsequent sink basin. This software is based on the approximation of a control volume with a three-dimensional mesh for flow calculation by solving the Navier-Stokes equations using a turbulence model. Through this study will report results of numerical simulation that are compared and analyzed with qualitative and quantitative results obtained from the study of the small-scale physical model. Through the analysis and discussion of the results show the evaluation of the three-dimensional numerical modeling with FLOW-3D constitutes a complementary support to physical modeling to study the hydraulic performance in hydraulic structures and also to check the correct designs. Finally, recommendations are made to make way for the implementation of future studies to compare and analyze the performance of other models of numerical simulation as a tool for the design and analysis of the operation of hydraulic structures and flow processes in civil engineering projects.

Keywords: Numerical modelling, FLOW-3D, small-scale Physical Model.



CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	14
1.1. Antecedentes	14
1.2. Justificación	14
1.3. Objetivo general	15
1.4. Objetivos específicos	15
1.5. Alcance	15
2. MATERIALES Y METODOS	16
2.1. Descripción general del Proyecto	16
2.1.1. Presa Lechugal 2	16
2.1.2. Obras Hidráulicas del Proyecto	17
2.2. Modelo físico	17
2.2.1. Descripción General	17
2.3. MODELIZACIÓN NUMÉRICA	18
2.3.1. Dinámica de fluidos computacional (CFD)	18
2.3.2. Modelo Numérico FLOW-3D	19
2.3.3. Fundamentos hidráulicos del modelo	20
2.3.4. Parámetros relevantes durante la Modelización Numérica en FLOW-3D	27
2.3.5. Calibración	28
2.3.6. Validación	29
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	31
3.1. Validación del modelo Numérico	31
3.2. Análisis del flujo en modelo validado	37
3.3. Análisis de Alternativas	39
3.3.1. Alternativa 1	39
3.3.2. Alternativa 2	40
3.4. Análisis de flujo en la alternativa 1	41
3.5. Análisis de flujo en alternativa 2	47
5. RECOMENDACIONES	54
6. REFERENCIAS	55
7. ANEXOS	57
ANEXO A: Parámetros de simulación en el Modelo Numérico FLOW-3D	57
A1. Creación de un nuevo espacio de trabajo.	57



A2. Creación de un archivo de simulación.....	58
A3. Parámetros establecidos para la simulación.	59
A4. Importación de la geometría y creación del mallado multi-bloque.	59
A5. Condiciones de la simulación.....	60
A6. Comportamiento de la simulación.	61
A7. Mensajes de alerta durante el proceso de simulación.....	61
ANEXO B: Alternativa 2.	62
B1. Vista en planta alternativa 2.	62
B2. Tipo de datos.....	62
B3. Modelo tridimensional.....	63
ANEXO C: Resultados finales y conclusiones de las simulación numérica con HEC-RAS para el vertedero de excesos Lechugal 2.....	64
C1. Vertedero Abanico - Alternativa No 1	64
ANEXO D: Planos de Diseño del Vertedero de Abanico, Rápidas y Cuenco disipador.	68
D1. Emplazamiento Obra de Alivio Presa Lechugal 2.....	68
D2. Planta Vertedero Frontal – Detalle del Creager y del Cuenco Disipador – Detalles muros salida y entrada.	68
D3. Corte B0-B3 Vertedero – Secciones A-A.....	68

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Proceso de refinamiento del mallado.	34
Tabla 2. Características de las simulaciones.	35
Tabla 3. Ventajas y desventajas del tamaño de celda.....	35
Tabla 4. Validación de velocidades en el modelo numérico.	37
Tabla 5. Parámetros de interés en la alternativa 1.	45
Tabla 6. Comparación entre el modelo unidimensional HEC-RAS y el modelo tridimensional FLOW-3D.....	46
Tabla 7. Parámetros de interés en la alternativa 2.	50
Tabla 8. Comparación de la velocidad en la alternativa 1 y 2.....	51



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema general del proyecto.	16
Figura 2. Vertedero de Abanico, Rápidas y Cuenco disipador.	18
Figura 3. Funciones de inter-conectividad de los tres elementos.....	19
Figura 4. Mallado multi-bloque y condiciones de contorno en FLOW-3D.....	28
Figura 5. Puntos de interés para la validación de resultados.	31
Figura 6. Comparación de velocidades con distintas rugosidades en el punto 4.	31
Figura 7. Mallado con tamaño de celda 30 cm.	32
Figura 8. Mallado correspondiente al modelo validado.	33
Figura 9. Comparación cualitativa del flujo a lo largo de la obra.	36
Figura 10. Distribución de velocidades en el vertedero en abanico, rápidas y su cuenco disipador.	37
Figura 11. Calados en modelo validado.....	38
Figura 12. Configuración de dados disipadores.	39
Figura 13. Entrada Fujimoto para rápidas dentadas.	39
Figura 14. Configuración general de un cuenco Tipo III USBR.....	40
Figura 15. Distribución de velocidades en el bloque 1.....	41
Figura 16. Campo de velocidad en el nivel 38 msnm.....	42
Figura 17. Vectores de velocidad en el nivel 41.6 msnm.	43
Figura 18. Distribución de velocidades en el bloque 3.....	44
Figura 19. Distribución de velocidades.	45
Figura 20. Campo de velocidades en el nivel 38 msnm.....	47
Figura 21. Distribución de velocidades en el bloque 1.....	48
Figura 22. Distribución de velocidades en el bloque 3.....	49
Figura 23. Calados en alternativa 2.	50



LISTA DE SIMBOLOS

$A_{x,y,z}$: Areas de flujo fraccionales en la dirección de los ejes.

$b_{x,y,z}$: Perdidas de flujo en medios porosos.

C_I : Número turbulento de Prandlt.

CNU: Constante por defecto del programa.

Diff_{k_T} : Difusión de la energía cinética turbulenta.

dA : Área diferencial de la superficie en la celda.

dQ : Flujo másico.

F_{SOR} : Tasa de cambio de volumen.

$f_{x,y,z}$: Aceleraciones de la viscosidad.

$G_{x,y,z}$: Aceleraciones del cuerpo.

I : Mezcla de la energía interna macroscópica.

n : Componente normal de salida a la superficie.

ρ : Densidad del fluido.

Q : Caudal

Q_{in} : Caudal de entrada.

Q_{out} : Caudal de salida.

R_{DIF} : Término de difusión de masa debido a turbulencia.

R_{SOR} : Fuente de masa.

RI_{DIF} : Difusión por turbulencia de la energía interna.

RI_{SOR} : Fuente de energía

t : tiempo

T : Temperatura

T_{DIF} : Difusión de la energía interna por transferencia de calor.

V_F : Fracción de volumen abierto a flujo (Volumen de control).

ρ_Q : Densidad del flujo.

μ : Viscosidad dinámica.

ν_T : Viscosidad turbulenta.



τ_{ij} : Esfuerzos.

k_T : Energía cinética turbulenta.

ε_T : Disipación de energía cinética turbulenta.

p : Presión.

ν_ε : Coeficiente de difusión para k_T .

u, v, w : Componentes cartesianas del vector velocidad.

x, y, z : Ejes coordenados cartesianos.

α : Nivel de significancia.

LISTA DE ABREVIATURAS

CDIS1: Coeficiente de la producción de la turbulencia en la disipación.

CDIS2: Coeficiente de decaimiento de la turbulencia en la disipación.

CDIS3: Coeficiente del empuje de la turbulencia en la disipación.

CFD: Computational Fluid Dynamics.

CSPRO, CRHO: Parámetros de turbulencia propios del programa.

HEC-RAS: Hydrologic Engineering Centers River Analysis System.

LH&DF: Laboratorio de Hidráulica y Dinámica de Fluidos.

msnm: Metros sobre el nivel del mar.

PROMAS: Programa para el Manejo del Agua y el suelo.



Yo, Diego Fernando Patiño Fernández, autor de la tesis **“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL FLUJO A TRAVÉS DE UN VERTEDERO EN ABANICO Y SU SUBSECUENTE CUENCO DISIPADOR MEDIANTE UN MODELO MATEMATICO DE FLUJO EN TRES DIMENSIONES”**, reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de INGENIERO CIVIL. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, Octubre de 2015

Diego Fernando Patiño Fernández

CI: 030269763-6



Yo, Diego Martín Vintimilla Vintimilla, autor de la tesis “**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL FLUJO A TRAVÉS DE UN VERTEDERO EN ABANICO Y SU SUBSECUENTE CUENCO DISIPADOR MEDIANTE UN MODELO MATEMATICO DE FLUJO EN TRES DIMENSIONES**”, reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de INGENIERO CIVIL. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, Octubre de 2015

Diego Martín Vintimilla Vintimilla

CI: 010606482-7



Yo, Diego Fernando Patiño Fernández, autor de la tesis “**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL FLUJO A TRAVÉS DE UN VERTEDERO EN ABANICO Y SU SUBSECUENTE CUENCO DISIPADOR MEDIANTE UN MODELO MATEMATICO DE FLUJO EN TRES DIMENSIONES**”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de mi exclusiva responsabilidad.

Cuenca, Octubre de 2015

Diego Fernando Patiño Fernández

CI: 030269763-6



Yo, Diego Martín Vintimilla Vintimilla, autor de la tesis “**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL FLUJO A TRAVÉS DE UN VERTEDERO EN ABANICO Y SU SUBSECUENTE CUENCO DISIPADOR MEDIANTE UN MODELO MATEMATICO DE FLUJO EN TRES DIMENSIONES**”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de mi exclusiva responsabilidad.

Cuenca, Octubre de 2015

Diego Martín Vintimilla Vintimilla

CI: 010606482-7



AGRADECIMIENTO

Extendemos nuestro sincero agradecimiento a las personas que hicieron posible la realización del presente proyecto de titulación. Al Ing. Vicente Tinoco por sus enseñanzas en la materia de Modelos Hidráulicos, y de manera especial a nuestro director el Ing. Felipe Cisneros PhD. por su valiosa guía y asesoramiento para la realización del presente proyecto de titulación.

Diego Fernando Patiño Fernández.

Diego Martín Vintimilla Vintimilla.



DEDICATORIA

A Dios por permitirme llegar hasta este momento muy importante de mi formación profesional. A mis padres, y mis hermanos por su cariño y apoyo incondicional. A mi esposa e hija pilares fundamentales en mi vida.

Diego Fernando Patiño Fernández.

A mi familia y amigos por su apoyo brindado durante mis estudios.

Diego Martín Vintimilla Vintimilla.



1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

En la provincia de los Ríos existen grandes extensiones de terrenos aptos para la agricultura, que es la principal fuente de ingresos para sus habitantes. Los agricultores de la zona se ven limitados a cultivar durante la época de invierno, que además de brindar agua para riego causa grandes estragos a la población del litoral ecuatoriano. Es por ello que para el gobierno es de vital importancia el control adecuado sobre el agua para su aprovechamiento.

El proyecto a implementar es el Proyecto PACALORI - Plan de Aprovechamiento y Control del Agua en la Provincia de los Ríos. El objetivo del Proyecto PACALORI es garantizar el suministro de agua para riego productivo agropecuario en la estación seca, a través de almacenar el agua en sus embalses durante la temporada de lluvias. De forma complementaria, las presas contribuirán al control de inundaciones mediante la laminación de avenidas.

Los diseños definitivos del proyecto PACALORI constan de dos trasvases: el Trasvase Quevedo-Macul-Mocache, con 7 presas y el Trasvase Calabí-Lechugal-Chojampe, con 6 presas. Las obras hidráulicas en estudio se encuentran en la Presa Lechugal 2 que corresponde al Trasvase Calabí-Lechugal-Chojampe y se alimenta por medio de un sistema de túneles de las aguas provenientes del río Calabí, así como las que puede generar su propia microcuenca. Estas obras han sido sujeto de estudio en modelo físico de escala reducida llevadas a cabo a través del Laboratorio de Hidráulica y Dinámica de Fluidos LH&DF del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Cuenca, en el Centro I+D+I PROMAS, mediante el cual se ha procedido con el análisis de procesos de flujo.

Es importante destacar, que en el estudio del desempeño de obras hidráulicas y el análisis de procesos de flujo, es necesaria la combinación de la modelización física y la modelización numérica. En el Laboratorio de Hidráulica & Dinámica de Fluidos LH&DF se realiza un estudio complementario que permite validar resultados obtenidos en el modelo físico de escala reducida así como realizar optimizaciones en algunas estructuras del proyecto.

En este sentido, se realiza un aporte académico para la generación de experiencias en torno al uso de la modelización numérica como herramienta de comprobación y toma de decisiones en obras hidráulicas. Por medio del presente estudio, se expone el procedimiento de implementación de un modelo numérico y los resultados referidos a un análisis comparativo.

1.2. Justificación

Debido a la complejidad de los procesos de flujo en las obras de alivio del Proyecto PACALORI, y como aporte a la construcción de experiencias en torno a la modelización numérica, se considera conveniente realizar un estudio que permite validar los resultados de la modelización física y disponer de mayores elementos para la optimización de aspectos de diseño y operación de las obras en consideración.

Por ello, se ha planteado pertinente dar paso a la investigación explorativa que permita a través de un análisis comparativo aportar de mejor manera a la consecución de objetivos técnicos/científicos que impulsen la generación de conocimiento en el ámbito de la Hidráulica y del diseño de Obras Hidráulicas.



1.3. Objetivo general

Analizar el comportamiento del flujo en un vertedero en abanico, su rápida y su subsecuente cuenco disipador mediante la implementación del modelo matemático FLOW-3D.

1.4. Objetivos específicos

- Analizar la configuración general en el Proyecto PACALORI de los aspectos relativos al comportamiento del flujo en el un vertedero en abanico, su rápida y su subsecuente cuenco disipador.
- Implementar el modelo matemático FLOW-3D.
- Analizar el desempeño hidráulico de las obras en estudio.

1.5. Alcance

En el presente trabajo se realiza un estudio exploratorio de la configuración, requerimientos y desempeño del modelo de simulación numérica FLOW-3D. Se genera información que permite: 1) la validación de resultados obtenidos en modelo físico de escala reducida y 2) el establecimiento de criterios y elementos adicionales para la optimización de los diseños de las obras de alivio del Proyecto PACALORI.

Por medio del presente estudio, se aporta al entendimiento, aplicación y desarrollo de conocimiento en modelización numérica para la optimización del diseño de obras de alivio en proyectos de Ingeniería del Agua.

Los resultados y productos establecidos en el estudio se sistematizan en el modelo matemático implementado para el análisis del correcto funcionamiento y diseño de la obra de alivio.

2. MATERIALES Y METODOS

2.1. Descripción general del Proyecto

El Proyecto PACALORI - Plan de Aprovechamiento y Control de Agua en la Provincia de Los Ríos. Dicha provincia está ubicada en la parte central de la cuenca del río Guayas y en el centro de la región litoral. Abarca una extensión territorial de 6633 km² que representa un 20% aproximadamente del área total de la Cuenca del río Guayas y está cubierta por un sistema hidrográfico en el que los ríos Vinces y Babahoyo son los principales.

El objetivo del Proyecto PACALORI es garantizar el suministro de agua para riego productivo agropecuario durante la estación seca, a través de almacenar el agua en sus embalses durante la temporada de lluvias. De forma complementaria, las presas contribuirán al control de inundaciones mediante la laminación de avenidas.

Los diseños definitivos del proyecto PACALORI constan de dos trasvases: el Trasvase Quevedo-Macul-Mocache, con 7 presas y el Trasvase Calabí-Lechugal-Chojampe, con 6 presas. Como se puede ver en la Figura 1, la Presa Lechugal 2 corresponde al Trasvase Calabí-Lechugal-Chojampe y se alimenta por medio de un sistema de túneles de las aguas provenientes del río Calabí, así como las que puede generar su propia microcuenca (PROMAS, 2015b).

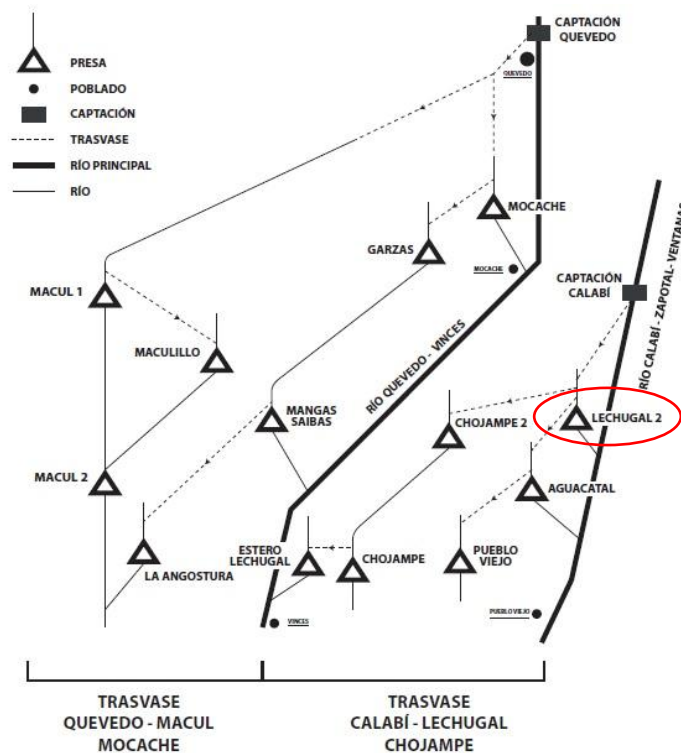


Figura 1. Esquema general del proyecto.

Fuente. (PROMAS, 2015b).

2.1.1. Presa Lechugal 2

El diseño definitivo de la presa de tierra Lechugal 2 está constituido por una cortina de material arcilloso compactado, altura máxima de 24.3 m, taludes de 1V :3H, en ambos lados, para garantizar los factores de seguridad mínimos exigidos por las normas en los tres estados de



carga considerando sismo inclusive, ancho de corona de 8.60 m por constituir parte de un Camino Vecinal, Tipo 7, con cota de corona de 42.90 msnm, con una berma de 4 m de ancho y cota 32.90 msnm, drenajes interior de colchón y exterior de pie de talud y colchón externo y pozos de alivio, dentellón de arcilla de 6 m de base y profundidad mínima en la zona del cauce de 4 m, recubrimiento del talud aguas arriba de enrocamiento a volteo y aguas abajo de capa vegetal sembrada de hierba (césped) (PROMAS, 2015b).

2.1.2. Obras Hidráulicas del Proyecto

Las obras hidráulicas están conformadas básicamente por un conjunto de obras de alivio, obras de desvío y obras de derivación.

Obras de Alivio

Se componen de un vertedero en abanico de cimacio tipo Creager con capacidad para derivar un caudal máximo de 326.44 m³/s, aguas abajo de dicha estructura, y de acuerdo a la configuración geométrica del mismo, se ha establecido un colchón de manera que forme un resalto hidráulico, aguas abajo de éste se colocará una transición de sección rectangular con una pendiente del 12.60%, seguidamente se dispone de cuatro rápidas de sección rectangular con pendientes del 3.20%, 25.00%, 0.15% y 24.50%, respectivamente, las cuales se empatan a un cuenco disipador tipo piscina; similar al Tipo I dado por la Bureau of Reclamation (PROMAS, 2015b).

Obra de Toma

La obra de toma está constituida por una torre, en la cual se encuentran compuertas tipo vagón para guarda y regulación de caudales; a más de dos tuberías, una para derivar los caudales de riego y ecológico y otra para desagüe de fondo. Las tuberías tanto para el caudal de riego y caudal ecológico como para el desagüe de fondo se han implementado con una tubería de 1500 mm de diámetro. A la entrada de dicha obra se dispone de un sistema de rejas para material grueso y otra para material fino (esta última solo para la tubería de riego y caudal ecológico). La disipación de energía se realiza medio un cuenco disipador a la salida de las tuberías más unos bloques de impacto para cada tubería ubicados dentro del mismo (PROMAS, 2015b).

Obra de Desvío

La obra de desvío se realizará mediante un túnel falso tipo baúl; el cual se usará para el almacenamiento de las tuberías de toma una vez finalizado la etapa de desvío. Adicionalmente, deberán configurarse ataguías temporales aguas arriba y abajo (PROMAS, 2015b).

2.2. Modelo físico.

2.2.1. Descripción General

El Programa para el Manejo del Agua y el suelo PROMAS conjuntamente con el Laboratorio de Hidráulica y Dinámica de Fluidos LH&DF del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Cuenca, procedieron a la construcción del modelo físico de escala reducida del vertedero de abanico y su cuenco disipador. Se trata de un modelo hidráulico a superficie libre con fondo fijo, el cual trabaja por acción de la gravedad cumpliendo la similitud de Froude. Es además un modelo no distorsionado a escala 1:35, el cual contempló una construcción de 40 m² para modelar 50000 m² en el prototipo cuya capacidad de máxima avenida es 326 m³/s (PROMAS, 2015a).

Los objetivos a cumplir en el modelo físico son:

- a) Evaluar el funcionamiento hidráulico del vertedero para la condición más crítica de descarga.
- b) Evaluar la distribución de velocidades en la estructura de evacuación de caudales
- c) Evaluar la eficiencia del cuenco disipador para las diferentes condiciones de descarga.



Figura 2. Vertedero de Abanico, Rápidas y Cuenco disipador.
Fuente. (PROMAS, 2015a).

2.3. MODELIZACIÓN NUMÉRICA

2.3.1. Dinámica de fluidos computacional (CFD)

La Dinámica de fluidos computacional (Computational Fluid Dynamics (CFD)) es una rama de la mecánica de fluidos que proporciona un medio de simulación mediante el uso de métodos numéricos y algoritmos para resolver y analizar de forma detallada cualquier sistema relacionado al flujo de fluidos con los fenómenos que se producen como consecuencia de dicho movimiento, como: La transferencia de calor, transporte de sólidos, reacciones químicas. Permitiendo su uso como una herramienta de diseño de obras hidráulicas.

Los CFD emplean técnicas numéricas para resolver las ecuaciones que gobiernan el flujo (Conservación de la masa, ecuación del transporte, energía y cantidad de movimiento). Una solución numérica de estas ecuaciones consiste en aproximar los diferentes términos con expresiones algebraicas. Las ecuaciones resultantes se resuelven para producir una solución aproximada para el problema original (Flow Science, 2014). La solución de estas ecuaciones requiere realizar dos discretizaciones, una espacial y una temporal, donde la calidad de la solución depende de dicha discretización (Torres Cámara & Grau Barceló, 2007).

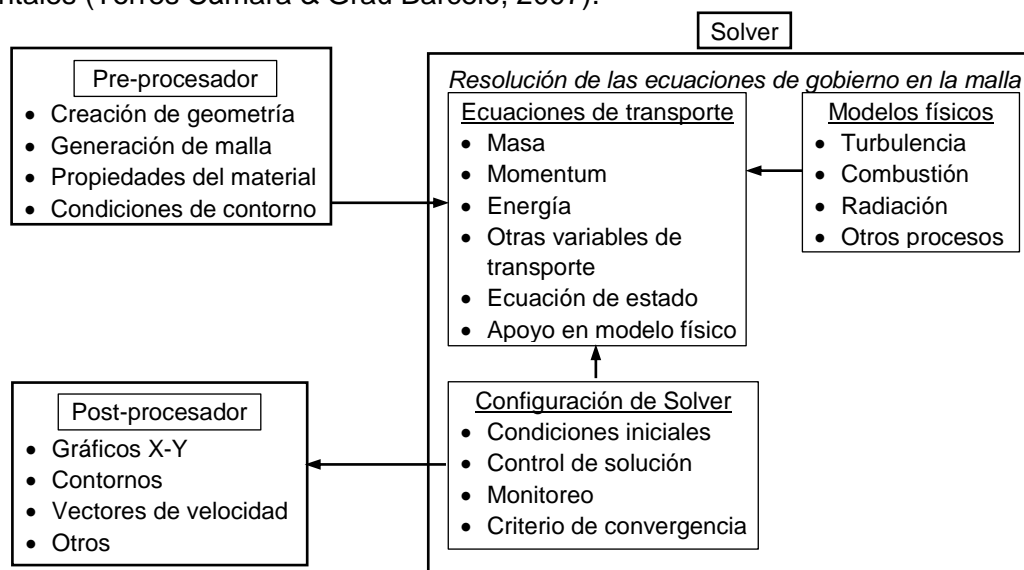
La metodología de solución mediante un CFD consta de tres etapas:

En la primera etapa se plantea la descripción físico-matemática del problema a resolver y se establece un modelo más o menos realístico del fenómeno real bajo estudio.

La segunda etapa consiste en realizar la discretización espacial y temporal del dominio de solución lo cual añade nuevas aproximaciones al proceso de resolución numérica

Por último en el análisis de resultados es de suma importancia su representación gráfica debido a que la cantidad de información obtenida en un proceso de simulación puede ser enorme (Torres Cámara & Grau Barceló, 2007).

Es recomendable siempre calibrar o validar el modelo numérico con un modelo físico, ya que la discretización utilizada puede dar lugar a diferencias entre el resultado final y las observaciones experimentales (Torres Cámara & Grau Barceló, 2007).



Fuente. (Jiyuan, Guan Heng, & Chaoqun, 2007).

2.3.2.1. Generalidades.

FLOW-3D desarrollado y comercializado desde 1980 por la compañía Flow Science en Santa Fe, New Mexico, USA. Se utiliza en Ingeniería Hidráulica, Ingeniería Marítima, Aeroespacial, procesos de generación de energía marina y/o hidráulica, siendo de especial aplicación a problemas en los que interviene lámina libre (hidráulica, naval, oleaje, etc.), arrastre y deposición de sedimentos, así como cuando se estudia la interacción fluido-estructura (Simulaciones y Proyectos, 2015).

Este software permite conocer la evolución de un fluido dentro de un dominio tridimensional sometido a diferentes condiciones físicas, mediante el uso de técnicas numéricas para resolver las ecuaciones tridimensionales de movimiento de fluidos para obtener soluciones transitorias, tridimensionales a multi-escala, problemas de flujo multi-físicos (Flow Science, 2014).



2.3.2.2. Ventajas y desventajas del modelo

La implementación de FLOW-3D puede ser llevada a cabo para múltiples aplicaciones siendo de gran interés el cálculo de flujo de agua a superficie libre, tema en que se debe prestar atención a lo siguiente:

- El paquete computacional posee una interfaz gráfica muy desarrollada que permite una fácil visualización y comprensión de los procesos, parámetros y procedimiento para llevar a cabo una simulación de cualquier modelo.
- La geometría, el mallado, las condiciones de contorno y parámetros de relevancia se definen de manera didáctica.
- Geometrías complejas pueden ser introducidas mediante la creación de “Solidos 3D” en un archivo CAD e importándolos en formato .stl (STereo Lithography).
- Posee implementado el algoritmo FAVOR™ (Fractional Area/Volume Obstacle Representation) que permite el procesamiento de la geometría para conocer la calidad del mallado.
- Permite el pre-procesamiento de la simulación para reconocer errores en algunos coeficientes que deben encontrarse en un rango establecido, conocer el número de celdas a simular y el tamaño de los archivos de resultados.
- El proceso de simulación es dinámico e intuitivo, permitiendo conocer la existencia de errores y su corrección, pese a que la simulación esté activa.
- No limita el número de celdas a utilizar.
- Cuenta con su propia herramienta de post-procesamiento para la generación de gráficos.

Así mismo FLOW-3D presenta algunas desventajas:

- Permite únicamente mallado estructurado, siendo poco apropiadas para geometrías complejas ya que no es posible la construcción de mallas con distintos tamaños de celdas en todo el dominio de trabajo.
- El tamaño de celda utilizado es inversamente proporcional al tamaño del archivo y al tiempo de la simulación. A menor tamaño de celda el archivo de resultados será más pesado.
- El número de celdas a utilizar debe ser de acuerdo a la capacidad del ordenador ya que exige alta capacidad computacional y de procesamiento de datos, requiriendo gran cantidad de espacio en el equipo y mayor tiempo en las simulaciones.

2.3.3. Fundamentos hidráulicos del modelo

La resolución de las ecuaciones diferenciales generales para la mecánica de fluidos implica que estas deben ser escritas en el sistema de coordenadas cartesiano (x, y, z) (Flow Science, 2014). El presente proyecto de titulación muestra las ecuaciones simplificadas válidas en la modelación numérica establecidas en el Manual del Programa.

Ecuación de conservación de la masa y sus variaciones

La ecuación general de la conservación de la masa es:

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u A_x) + R \frac{\partial}{\partial y}(\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w A_z) + \xi \frac{\partial \rho u A_x}{\partial x} = R_{DIF} + R_{SOR} \quad (2-1)$$

Donde:

V_F : Fracción de volumen abierto a flujo (volumen de control).



ρ : Densidad del fluido.

R_{DIF} : Término de difusión de masa debido a turbulencia.

R_{SOR} : Fuente de masa.

Los componentes de velocidad (u, v, w) están en el sistema coordenado (x, y, z) . A_x es el área de flujo fraccional en la dirección x , A_y y A_z son las áreas de flujo fraccionales similares en la dirección y y z respectivamente. Los coeficientes R y ξ dependen del sistema de coordenadas seleccionado. En el sistema cartesiano $R = 1$ y $\xi = 0$ (Flow Science, 2014).

Ecuación de la conservación de la cantidad de movimiento

Las ecuaciones de cantidad de movimiento para un fluido tridimensional con velocidades (u, v, w) en las direcciones coordenadas son las ecuaciones de Navier-Stokes con términos adicionales (Flow Science, 2014).

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} - \xi \frac{A_y v^2}{x V_F} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x - b_x - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (u - u_w - \delta u_s) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} + \xi \frac{A_y u v}{x V_F} &= -\frac{1}{\rho} \left(R \frac{\partial p}{\partial y} \right) + G_y + f_y - b_y - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (v - v_w - \delta v_s) \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} &= -\frac{1}{\rho} \left(R \frac{\partial p}{\partial z} \right) + G_z + f_z - b_z - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (w - w_w - \delta w_s) \end{aligned} \quad (2-2)$$

Donde:

(G_x, G_y, G_z) : Aceleraciones del cuerpo.

(f_x, f_y, f_z) : Aceleraciones de la viscosidad.

(b_x, b_y, b_z) : Pérdidas de flujo en medios porosos.

El término $U_w = (u_w, v_w, w_w)$ en las ecuaciones (2-2) es la velocidad de la componente de la fuente, que generalmente no es cero para el caso de que se encuentren sólidos en movimiento.

El término $U_s = (u_s, v_s, w_s)$ es la velocidad de la superficie de la fuente relativa a sí misma, que se calcula en cada volumen de control como:

$$U_s = \frac{dQ}{\rho_Q dA} n \quad (2-3)$$

Donde:

dQ : Flujo másico.

ρ_Q : Densidad del flujo.

dA : Área diferencial de la superficie en la celda.

n : Componente normal de salida a la superficie.

En las ecuaciones (2-2) $\delta = 0$ si existe una presión de estancamiento, la cual se presenta cuando el fluido entra a zonas de velocidad cero. Si $\delta = 1$ existe una presión estática que se calcula a través del flujo másico y el área de superficie de control (Flow Science, 2014).

Para una viscosidad dinámica variable μ , las aceleraciones viscosas son:

$$\begin{aligned}\rho V_F f_x &= wsx - \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (A_x \tau_{xx}) + R \frac{\partial}{\partial y} (A_y \tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_z \tau_{xz}) + \frac{\xi}{x} (A_x \tau_{xx} - A_y \tau_{xy}) \right\} \\ \rho V_F f_y &= wsy - \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (A_x \tau_{xy}) + R \frac{\partial}{\partial y} (A_y \tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_z \tau_{yz}) + \frac{\xi}{x} (A_x + A_y \tau_{xy}) \right\} \\ \rho V_F f_z &= wsz - \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (A_x \tau_{xz}) + R \frac{\partial}{\partial y} (A_y \tau_{yz}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_z \tau_{zz}) + \frac{\xi}{x} (A_x \tau_{xz}) \right\}\end{aligned}\quad (2-4)$$

Donde:

$$\begin{aligned}\tau_{xx} &= -2\mu \left\{ \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{1}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + R \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\xi u}{x} \right) \right\} \\ \tau_{yy} &= -2\mu \left\{ R \frac{\partial v}{\partial y} + \xi \frac{u}{x} - \frac{1}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + R \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\xi u}{x} \right) \right\} \\ \tau_{zz} &= -2\mu \left\{ \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{1}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + R \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\xi u}{x} \right) \right\} \\ \tau_{xy} &= -\mu \left\{ \frac{\partial v}{\partial x} + R \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\xi v}{x} \right\} \\ \tau_{xz} &= -\mu \left\{ \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right\} \\ \tau_{yz} &= -\mu \left\{ \frac{\partial v}{\partial z} + R \frac{\partial w}{\partial y} \right\}\end{aligned}\quad (2-5)$$

Esfuerzos de corte en las paredes

En las expresiones anteriores, los términos wsx , wsy , y wsz son conocidas como esfuerzo de corte en las paredes. Si se omiten estos términos, no existe esfuerzo de corte debido a que los términos restantes contienen las áreas de flujo fraccional (A_x, A_y, A_z) que desaparecen de las paredes. Los esfuerzos en las paredes son modelados asumiendo que la velocidad tangencial es cero en la porción de alguna área cerrada a flujo. En flujo turbulento se asume un perfil de velocidades cercano a las paredes que modifican la magnitud de los esfuerzos de corte en las paredes (Flow Science, 2014).

Evaluación de la viscosidad

La viscosidad dinámica μ , puede ser asignada como una constante molecular si se trata de fluidos newtonianos. Cuando se utiliza un modelo de turbulencia la viscosidad es la suma de la constante molecular y la viscosidad turbulenta (Flow Science, 2014).



Ecuación del flujo a superficie libre (VOF)

Las configuraciones del fluido son definidas en términos del VOF (Volumen of fluid) que ingresa la fracción de fluido para cada volumen de control diferencial como parámetro a calcularse en la ecuación de transporte, el cual es $F(x, y, z, t)$ (Flow Science, 2014).

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left[\frac{\partial}{\partial x} (F A_x u) + R \frac{\partial}{\partial y} (F A_y v) + \frac{\partial}{\partial z} (F A_z w) + \xi \frac{F A_x u}{x} \right] = F_{DIF} + F_{SOR} \quad (2-6)$$

Donde:

$$F_{DIF} = \frac{1}{V_F} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (v_F A_x \frac{\partial F}{\partial x}) + R \frac{\partial}{\partial x} (v_F A_y R \frac{\partial F}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (v_F A_z \frac{\partial F}{\partial z}) + \xi \frac{v_F A_x F}{x} \right\} \quad (2-7)$$

El coeficiente de difusión es definido como $v_F = cF\mu/\rho$ donde cF es una constante recíproca y referida al número de turbulencia de Schmidt. Este término de difusión solo tiene lugar en tanto se mezclen dos fluidos cuya distribución es definida por la función F .

El término F_{SOR} se refiere a la tasa de cambio de volumen R_{SOR} en la ecuación (2-1).

F Representa la fracción de volumen ocupada por el fluido en el modelo por lo cual, se puede afirmar que cuando existe fluido $F = 1$ si no $F = 0$, para modelos con fluido incompresible a superficie libre, el programa considera vacío a los espacios libres (Flow Science, 2014).

Ecuación de la conservación de la energía

Para fluidos compresibles o térmicos, la ecuación de energía interna es:

$$V_F \frac{\partial}{\partial t} (\rho I) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho I u A_x) + R \frac{\partial}{\partial y} (\rho I v A_y) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho I w A_z) + \xi \frac{\rho I u A_x}{x} = -p \left\{ \frac{\partial u A_x}{\partial x} + R \frac{\partial v A_y}{\partial y} + \frac{\partial w A_z}{\partial z} + \xi \frac{u A_x}{x} \right\} + R I_{DIF} + T_{DIF} + R I_{SOR} \quad (2-8)$$

Donde I es la mezcla de energía interna macroscópica, $R I_{DIF}$ es la difusión por turbulencia de la energía interna y el otro T_{DIF} por la transferencia de calor.

Estos términos se definen en las ecuaciones (2-9) y (2-10):

$$R I_{DIF} = \frac{\partial}{\partial x} (v_I A_x \frac{\partial \rho I}{\partial x}) + R \frac{\partial}{\partial y} (v_I A_y \frac{\partial \rho I}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (v_I A_z \frac{\partial \rho I}{\partial z}) + \xi \frac{v_I A_x \rho I}{x} \quad (2-9)$$

$$T_{DIF} = \frac{\partial y}{\partial x} (k A_x \frac{\partial T}{\partial x}) + R \frac{\partial}{\partial y} (k A_y R \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (k A_z \frac{\partial T}{\partial z}) + \xi \frac{k A_x T}{x} \quad (2-10)$$

El coeficiente $v_I = C_I \mu / \rho$ donde C_I es el número recíproco turbulento de Prandlt. Y para el caso de la difusión térmica k es el coeficiente de conductividad térmica. Se puede especificada directamente valor que se desee. Para problemas de dos fluidos las conductividades para cada fluido son localmente determinadas mediante el volumen de flujo fraccional F .

El ultimo termino $R I_{SOR}$ en la derecha de la ecuación (2-8) es el término de la fuente de energía. Las fuentes pueden ser asociadas con la fuente de masa R_{SOR} , con mecanismos de transferencia de calor en fronteras sólidas, o con fuentes de calor distribuidas en el fluido y el calor generado por la viscosidad (Flow Science, 2014).



2.3.3.1. Turbulencia

La turbulencia es el movimiento caótico e inestable de los fluidos que ocurre cuando las fuerzas viscosas son insuficientes para estabilizarlos. Se mide a través del número de Reynolds, cuyos altos valores indican flujo turbulento; la estabilidad natural del fluido disminuye, en consecuencia se produce la formación de remolinos de diversos tamaños (Flow Science, 2014).

El paquete computacional puede aproximar las fluctuaciones de turbulencia con las ecuaciones de continuidad y conservación de la cantidad de movimiento; por medio de un mallado extremadamente detallado. Sin embargo, estas mallas son muy difíciles de construir debido a las limitaciones de memoria en el computador y el tiempo de procesamiento (Flow Science, 2014).

En FLOW 3D existen seis modelos disponibles: Modelo de Longitud de Mezcla de Prandtl, Modelo de una ecuación, Modelo de dos ecuaciones $k-\varepsilon$, Modelo RNG (Renormalized group model), Modelo de dos ecuaciones $k-\omega$, Modelo LES (Large Eddy Simulation)

La turbulencia no debe ser ignorada en la Modelización Numérica. Por lo tanto, hay que recurrir a la modelización simplificada que describe los efectos de la turbulencia.

En el presente proyecto se utiliza el modelo de turbulencia de dos ecuaciones $k-\varepsilon$, explicado a continuación.

Modelo de Turbulencia $k-\varepsilon$

Para resolver las ecuaciones de flujo turbulento se realiza una aproximación estadística donde la variable en estudio se descompone en la suma de un valor promedio más una fluctuación. Por ejemplo para una variable escalar cualquiera ϕ (presión, velocidad, temperatura) se tiene la siguiente aproximación (Martínez Nelis & Valencia Musalem, 2010).

$$\phi = \bar{\phi} + \phi' \quad (2-11)$$

De esta manera las ecuaciones de Navier y Stokes se reformulan en términos del valor promedio y la fluctuación para un sistema de ecuaciones para flujo incompresible; donde aparece el término $\overline{u'_i u'_j}$, conocido como Tensor de Esfuerzos de Reynolds (Cea Gómez, 2005). Estos esfuerzos son los debidos a la cantidad de movimiento turbulenta transportada en el flujo y son las responsables de la disipación de energía debido a las fluctuaciones (Castilla & Gamez Montero, 2012).

El tensor de esfuerzos de Reynolds son seis nuevas incógnitas que necesitan ser calculadas. Esto se conoce como el problema de cierre de la turbulencia, ya que hay más incógnitas que soluciones y por lo tanto es necesario cerrar el problema con ecuaciones adicionales (Cea Gómez, 2005). Para cerrar este sistema distintos autores proponen discretizaciones en donde surge el concepto de *viscosidad turbulenta* que requiere ser modelada.

La relación entre las tensiones de Reynolds y las variables debe ser especificada en forma externa y se realiza a través de modelos que contienen una dosis de especulación teórica combinada con evidencias experimentales (Nigro & Storti, 2007).



Se define v_T como la viscosidad turbulenta o de remolino la cual no es una propiedad del fluido como ocurre con la viscosidad laminar, sino que depende principalmente del estado de turbulencia del flujo (Martínez Nelis & Valencia Musalem, 2010), y posee la siguiente expresión:

$$v_T = CNU \frac{k_T^2}{\varepsilon_T} \quad (2-12)$$

Donde:

CNU: Constante por defecto cuyo valor es 0.09 (FLOW 3D)

k_T : Energía cinética turbulenta.

ε_T : Disipación de energía cinética turbulenta.

La formulación que utilizan los paquetes computacionales para la modelación de los términos k_T y ε_T difiere ligeramente, debido a que FLOW 3D incluye la influencia de las áreas/volúmenes fraccionarios en el método FAVOR™ (Flow Science, 2014).

El modelo $k-\varepsilon$ relaciona la existencia de la energía cinética k_T y la disipación de la misma energía ε_T . Este modelo proporciona una razonable aproximación para distintos tipos de fluidos por medio de dos ecuaciones.

Para la energía cinética, k_T :

$$\frac{\partial k_T}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial k_T}{\partial x} + v A_y \frac{\partial k_T}{\partial y} + w A_z \frac{\partial k_T}{\partial z} \right\} = P_T + G_T + \text{Diff}_{k_T} - \varepsilon_T \quad (2-13)$$

En esta expresión V_F , A_x , A_y , y A_z son funciones del algoritmo FAVOR propio del modelo numérico FLOW 3D, P_T es la producción de la energía cinética turbulenta.

$$P_T = \text{CSPRO} \left(\frac{\mu}{\rho V_F} \right) \left\{ 2A_x \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2A_y \left(R \frac{\partial v}{\partial y} + \xi \frac{u}{x} \right)^2 + 2A_z \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + R \frac{\partial u}{\partial y} - \xi \frac{v}{x} \right) \left[A_x \frac{\partial v}{\partial x} + A_y \left(R \frac{\partial u}{\partial y} + \xi \frac{v}{x} \right) \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \left(A_z \frac{\partial u}{\partial z} + A_z \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + R \frac{\partial w}{\partial y} \right) \left(A_z \frac{\partial v}{\partial z} + A_y R \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right\} \quad (2-14)$$

Donde:

CSPRO: Parámetro de turbulencia, cuyo valor por defecto es 1.

El término de producción de empuje es:

$$G_T = -\text{CRHO} \left(\frac{\mu}{\rho^3} \right) \left(\frac{\partial \rho}{\partial x} \frac{\partial p}{\partial x} + R^2 \frac{\partial \rho}{\partial y} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \rho}{\partial z} \frac{\partial p}{\partial z} \right) \quad (2-15)$$

Donde:

μ : Viscosidad dinámica molecular.

ρ : Densidad del fluido.

p : Presión.

CRHO: Es otro parámetro de turbulencia, cuyo valor por defecto es 0.



El término de difusión, Diff_{k_T} , es:

$$\text{Diff}_{k_T} = \frac{1}{v_F} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(v_k A_x \frac{\partial k_T}{\partial x} \right) + R \frac{\partial}{\partial y} \left(v_k A_y R \frac{\partial k_T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_k A_z \frac{\partial k_T}{\partial z} \right) + \xi \frac{v_k A_x k_T}{x} \right\} \quad (2-16)$$

Donde:

v_ε : Coeficiente de difusión para k_T (obtenido computacionalmente basándose en un valor local de la viscosidad turbulenta).

Para la disipación turbulenta, ε_T :

$$\frac{\partial \varepsilon_T}{\partial t} + \frac{1}{v_F} \left\{ u A_x \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial y} + w A_z \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial z} \right\} = \frac{\text{CDIS1} \cdot \varepsilon_T}{k_T} (P_T + \text{CDIS3} \cdot G_T) + \text{Diff}_\varepsilon - \text{CDIS2} \frac{\varepsilon_T^2}{k_T} \quad (2-17)$$

En esta expresión CDIS1 (Coeficiente de la producción de la turbulencia en la disipación), CDIS2 (Coeficiente de decaimiento de la turbulencia en la disipación) y CDIS3 (Coeficiente del empuje de la turbulencia en la disipación) son coeficientes adimensionales que tienen valores por defecto de 1.44, 1.92 y 0.2 respectivamente para el modelo $k-\varepsilon$ (Flow Science, 2014).

La difusión de la disipación, Diff_ε , es:

$$\text{Diff}_\varepsilon = \frac{1}{v_F} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(v_\varepsilon A_x \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial x} \right) + R \frac{\partial}{\partial y} \left(v_\varepsilon A_y R \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_\varepsilon A_z \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial z} \right) + \xi \frac{v_\varepsilon A_x \varepsilon_T}{x} \right\} \quad (2-18)$$

Donde:

v_ε : Coeficiente para ε_T (obtenido computacionalmente basándose en un valor local de la viscosidad turbulenta).

La ecuación (2-13) y la ecuación (2-17) se utilizan para el modelo de turbulencia $k-\varepsilon$, este modelo es comúnmente utilizado en los modelos numéricos en el paquete computacional FLOW 3D. Hay que tomar en cuenta que todos los flujos difusivos y advectivos son automáticamente cero en las paredes rígidas donde la fracción de fluido F, desaparece.

Resolución

El método VOF -Volumen of Fluid- desarrollado por Flow Science proporciona la forma más precisa de cálculo de las interfaces de fluidos a través de un mallado de cálculo mientras se conserva la interfaz nítida y bien definida. Hay tres elementos claves que deben existir en cualquier herramienta de CFD con el fin de llamar un método VOF.

En primer lugar, F debe ser una variable de fracción fluida, que rastrea la cantidad de líquido dentro de una celda computacional dada. En segundo lugar, se requiere un algoritmo de advección, no sólo para la advección de F, sino para mantener la interfaz, y en tercer lugar, las condiciones de contorno de la superficie libre se deben aplicar a la interfaz.

Este esquema de advección de FLOW-3D se llama TruVOF® que satisface estos requisitos y contiene mejorar para mantener la interfaz precisa. Esta técnica contiene una lógica que determina cómo el fluido está orientado dentro de una celda que es adecuadamente aplicado a las celdas vecinas. Por ejemplo, si la fracción de fluido es 0,5 (medio completo), determina la orientación de fluido basado en la fracciones de fluido en las células vecinas.



2.3.4. Parámetros relevantes durante la Modelización Numérica en FLOW-3D

A continuación se describen los parámetros de mayor relevancia durante la modelización numérica en FLOW-3D.

- Creación de geometría: La geometría del vertedero de abanico y su cuenco disipador fue modelada mediante un software CAD, mediante la creación de SOLIDOS 3D. Cabe destacar es de principal importancia modelar la obra con muros para evitar problemas. Luego, el modelo tridimensional de la geometría es exportado en formato .stl. Este archivo es importado al modelo numérico FLOW-3D.
- Generación de malla: En base a la geometría se debe crear mediante la interfaz del programa un mallado que abarque la parte en estudio. En nuestro caso se crearon tres bloques: Bloque 1 - Vertedero de abanico, Bloque 2 – Rápidas, Bloque 3 – Cuenco disipador.
- Propiedades del material: Únicamente se asigna el valor de la rugosidad, la misma que está sujeta a variación durante la etapa de calibración.
- Condiciones de contorno: En la cara del bloque 1 la condición de “Caudal de entrada” utilizando el valor del caudal de la crecida máxima probable $Q_{in}=326.44 \text{ m}^3/\text{s}$. En la cara final del bloque 3 la condición de “Caudal de salida” y estableciendo $Q_{out}=Q_{in}$.
- Condiciones iniciales: Se asigna para la modelización numérica el valor de $g=9.81 \text{ m/s}^2$, y las propiedades del agua a 20°C . A continuación se establece la condición de presión hidrostática para que el flujo se presente como hidráulico.
Por último, se selecciona el modelo de turbulencia $k-\varepsilon$, ya que es un modelo robusto que relaciona la existencia de la energía cinética k_T y la disipación de la misma energía ε_T , proporcionando una razonable aproximación para fluidos con evidente presencia de turbulencia en el flujo.

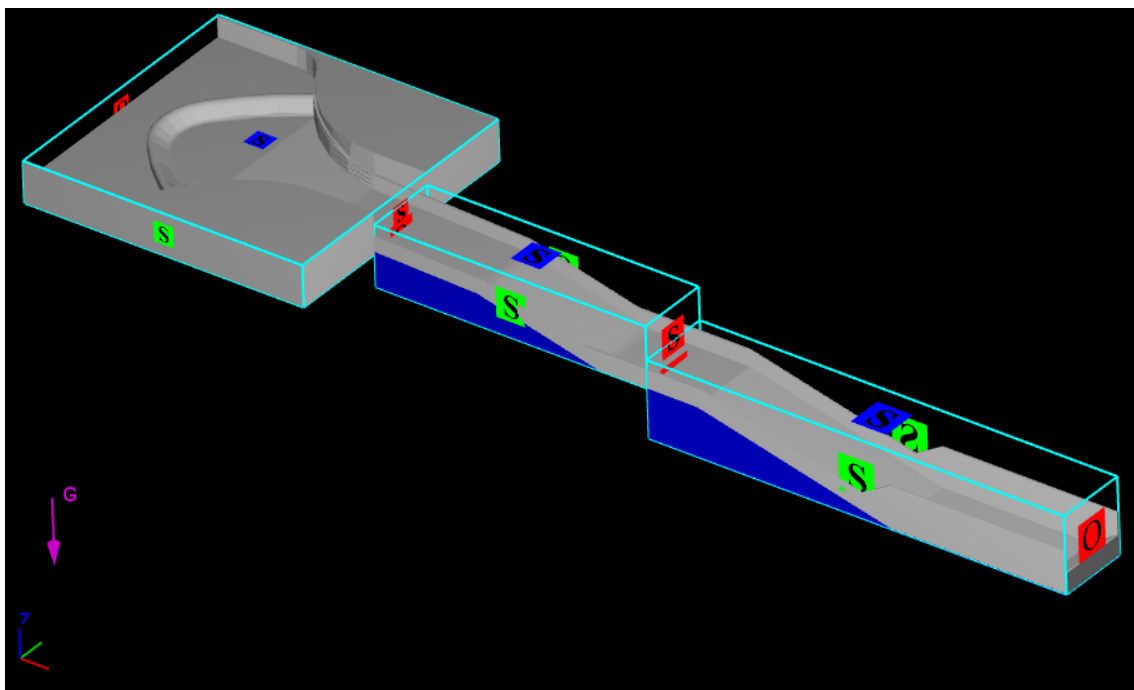


Figura 4. Mallado multi-bloque y condiciones de contorno en FLOW-3D.

- **Solver y definición de resultados:** Se establecen los resultados que se requieren en la simulación, para ser presentados. En este proyecto solo se definen los resultados referentes a la hidráulica. El programa devuelve gran cantidad de datos para cada celda, representando una desventaja durante la etapa de post-procesamiento.

Durante esta etapa, FLOW-3D permite seguir el transcurso de esta mediante una gráfica que indica la estabilidad de la simulación. Además se pueden visualizar mensajes de alerta y error. Cuando cualquier mensaje es persistente, la simulación se detiene y se debe corregirlos sometiendo a un proceso de refinación del mallado en las zonas donde predominan los mensajes de error, verificando se cumplan los parámetros recomendados en el manual de usuario (Flow Science, 2014). Si estos mensajes no son persistentes o se presentan en una zona que no es relevante para las condiciones de flujo, estos se pueden despreciar (Ruiz Coello & Narváez Herrera, 2015).

2.3.5. Calibración

La calibración del modelo consiste en ajustar parámetros físicos, hidráulicos necesarios que permitan que el modelo numérico sea lo más semejante al modelo físico, ya que de esto depende una mejor interpretación de resultados entre los dos (Ojeda García & Tapia Caiza, 2011).

Las variables más representativas a la hora de calibrar el modelo son la velocidad en los puntos de interés de la estructura; y los calados en los mismos puntos de interés. Para lograr esto los parámetros con mayor influencia al momento de ser ajustadas, son la rugosidad y tamaño de celdas en la malla.



En la calibración del modelo numérico en función del nivel de agua y velocidades, para los caudales característicos medidos se comparan con los correspondientes valores medidos en el modelo físico de tal manera que:

Para una descarga constante $Q_i = \text{const.}$

a) Velocidad modelo numérico < Velocidad modelo físico medida

Nivel de agua modelo numérico > Nivel de agua modelo físico medido.

EL MODELO NUMERICO ES MÁS RUGOSO

b) Velocidad modelo numérico > Velocidad modelo físico medida

Nivel de agua modelo numérico < Nivel de agua modelo físico medido

EL MODELO ES MÁS LISO

Las situaciones (a) y (b) obligan a corregir la rugosidad del modelo, sea alisando o incrementando físicamente la rugosidad absoluta respectivamente, hasta que el modelo alcance la rugosidad optima y se cumpla la condición de calibración del modelo numérico.

Es necesario examinar lo que ocurre en los datos de salida del modelo numérico para entender el comportamiento del flujo y cuáles son los parámetros de mayor relevancia, para ajustarlos correctamente con la mayor certeza.

2.3.6. Validación

La validación consiste en la comparación de los datos obtenidos en el modelo numérico con los datos experimentales en el modelo físico, y que estos presenten semejanza con un error bajo y variaciones coherentes en los resultados. Los datos deben ser comparados en la misma sección de control.

Los valores obtenidos en el modelo físico se realizan de forma experimental y por lo tanto son inherentes a los resultados del modelo numérico; estos datos se consideran como verdaderos y de absoluta confianza que pueden ser utilizados para la validación.

Para validar el modelo matemático, se evaluaron cuantitativamente y cualitativamente estos aspectos (Dios, Angulo, Blanco, & Liscia, 2014):

- Medición de perfiles longitudinales a lo largo de la obra
- Medición de calados a lo largo de la obra
- Comparación cualitativa del patrón de flujo a lo largo de la obra
- Comprobar la continuidad de caudal a lo largo de la obra

Para considerar un modelo valido, varios autores así como el Manual FLOW-3D, recomiendan errores menores al 5% en las comparaciones cuantitativas del modelo físico y numérico; caso contrario deberán revisarse parámetros, modelo de turbulencia y de no ajustarse es posible que exista error en el modelo físico (Flow Science, 2014).



3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Validación del modelo Numérico

Para la Validar el modelo matemático, se simulo la geometría del vertedero sin ninguna rugosidad artificial (dados). Es necesario comparar las velocidades del modelo físico y el numérico, en puntos comunes en el espacio; estos puntos se muestran a continuación.

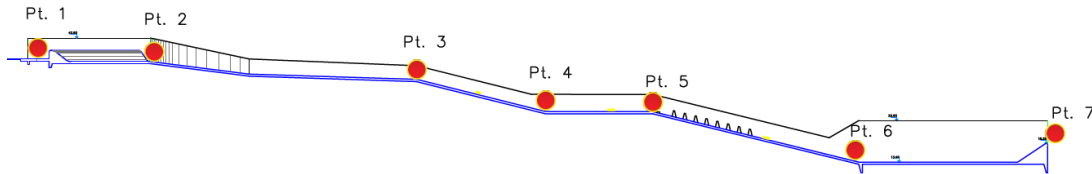


Figura 5. Puntos de interés para la validación de resultados.

Los puntos de la Figura 5 son de interés para la calibración y para el comportamiento del flujo en la estructura. Se consiguió validar el modelo numérico modificando 2 parámetros: la rugosidad de Manning y el tamaño de celda con los siguientes parámetros.

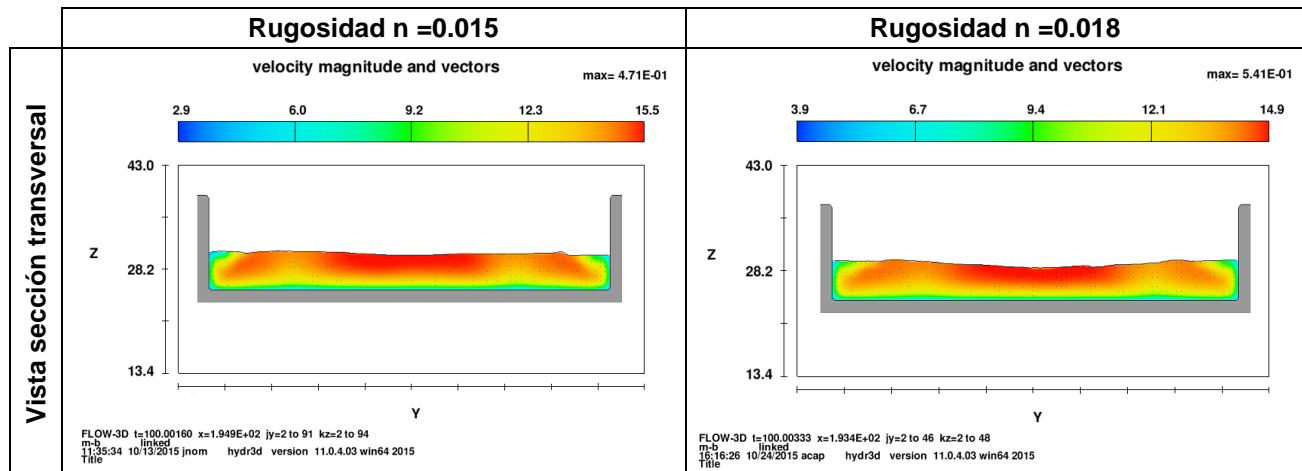


Figura 6. Comparación de velocidades con distintas rugosidades en el punto 4.

Con una rugosidad inicial de $n = 0.015$, el modelo posee velocidades altas, muy superiores a las del modelo físico. Se consigue una mejor aproximación para una rugosidad de $n = 0.018$, obteniendo velocidades más bajas con una desviación promedio de 0.178 m/s y un error promedio de 2.9%.

El tamaño de celda en el mallado es un parámetro fundamental en el modelo, ya que influye directamente en el número de celdas, el tiempo computacional y la calidad de los resultados.

El tamaño de celda de un valor inicial de 30 cm, genera errores directos de apreciación (flujo estancado, goteo). Para el modelo calibrado tenemos un valor de celda de 5 cm y 10 cm que representa de forma más real el flujo sobre la obra y muy similar al modelo físico.

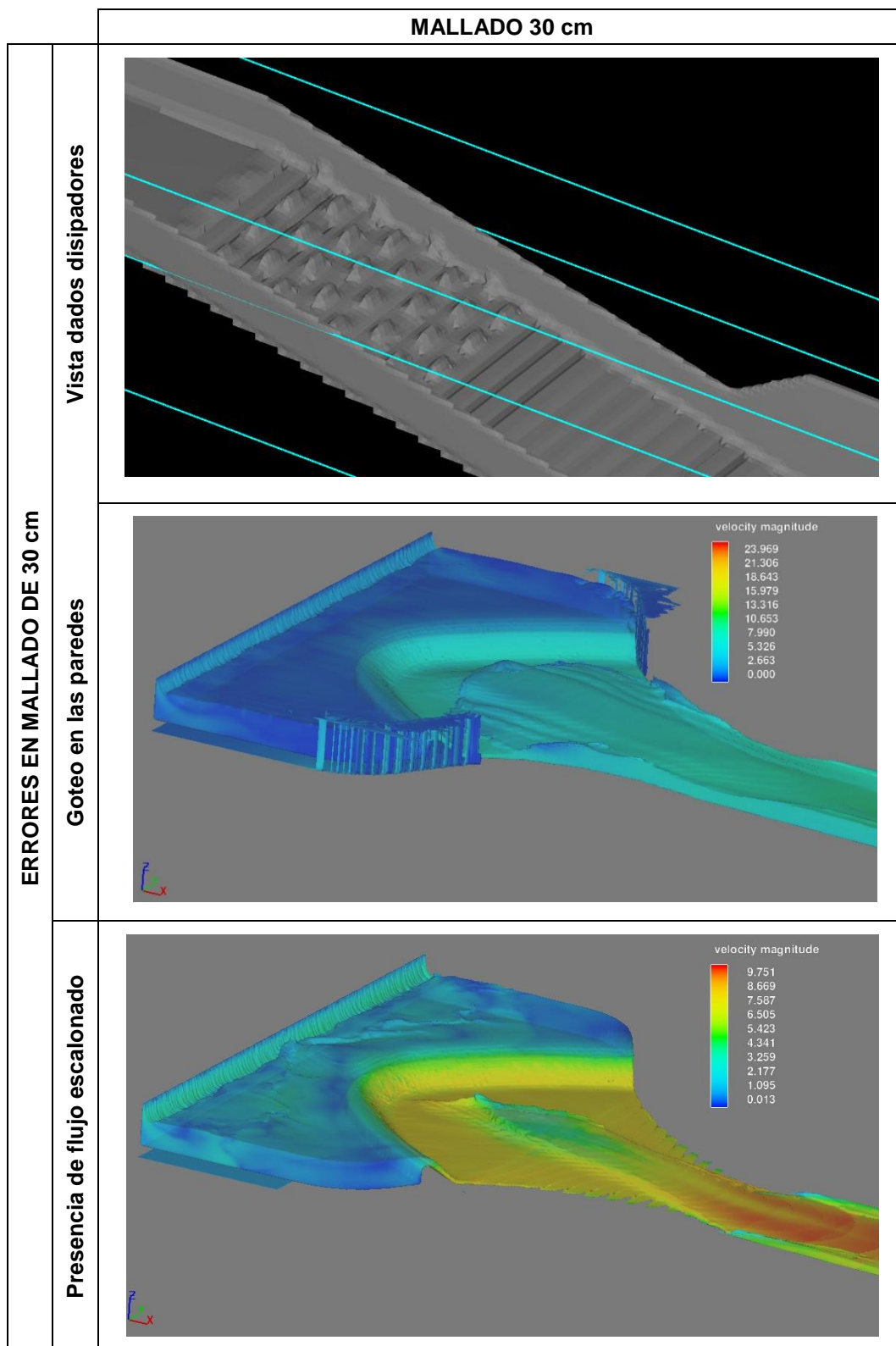


Figura 7. Mallado con tamaño de celda 30 cm.

El tamaño máximo de celda para apenas reconocer la geometría de la obra es de 30 cm, pero aún es muy brusca, y produce errores a la hora de cálculo. Se aprecia un flujo goteado en las paredes, debido a la geometría complicada en dichas zonas, existen errores de apreciación visual con respecto al modelo físico. Adicionalmente, se produce el efecto escalonado que corta la continuidad del flujo generando errores en los resultados finales.

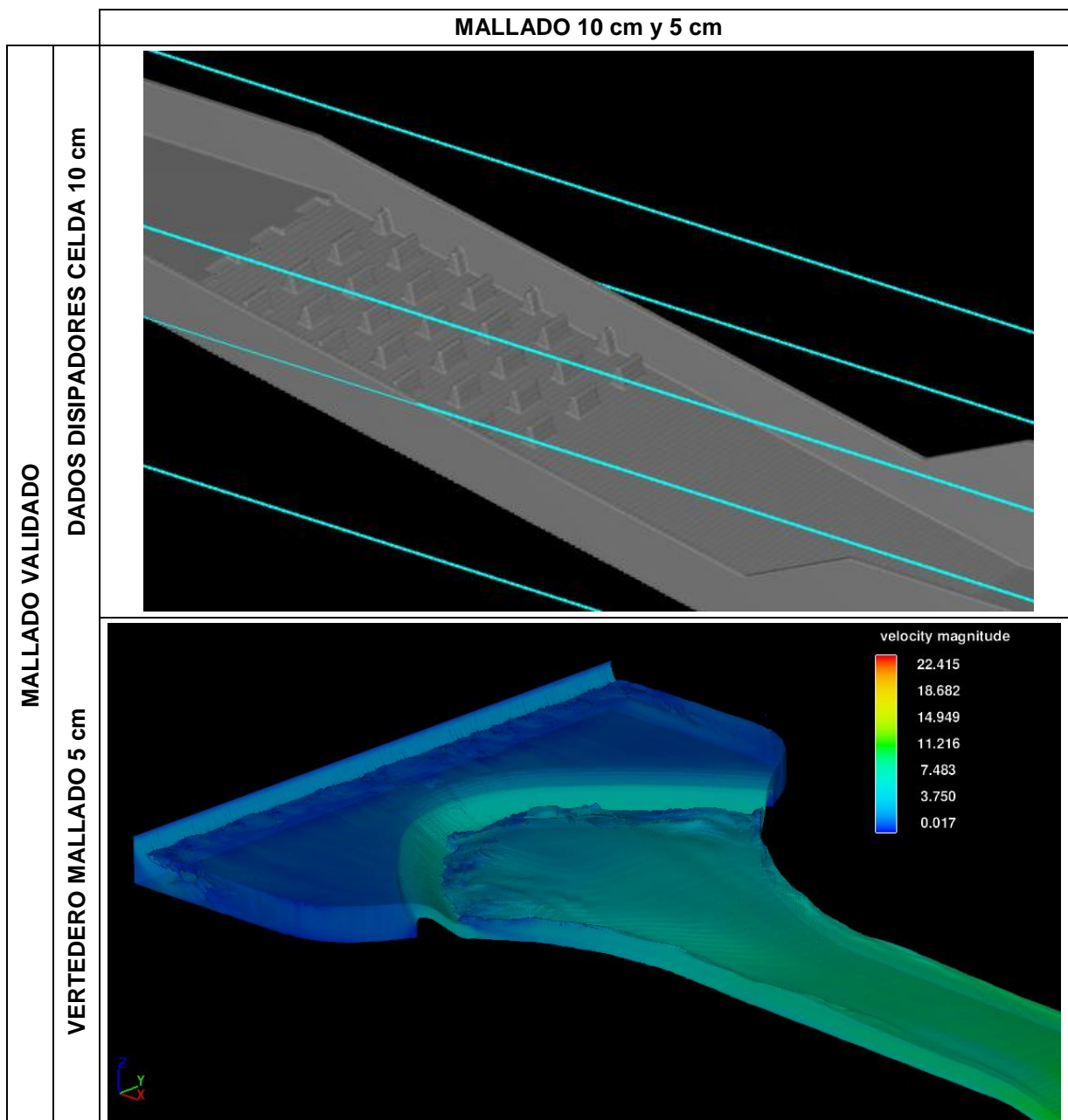


Figura 8. Mallado correspondiente al modelo validado.

En la Figura 8 se aprecia la geometría con mejor detalle en secciones complejas, además se eleva el costo computacional, pero está dentro de límites razonables. Con el refinamiento del mallado se consigue observar el flujo continuo y sin goteos, con una aproximación más detallada en la geometría de la obra.

Para conseguir un buen mallado se sigue el proceso de refinamiento con distintas alternativas, que se muestran en la Tabla 1.

Tamaño de celdas			Observaciones
Bloque 1	Bloque 2	Bloque 3	
cm	cm	cm	
50	50	50	Se generan errores en el flujo. Efecto escalonado, flujo fuera del vertedero, errores en las paredes. Requiere mayor resolución.
50	30	30	Se generan 17 errores consecutivos en una celda del bloque 1. El programa detiene la simulación. Es necesario refinar el mallado en el bloque 1.
30	30	30	Alertas de errores en el bloque 1. Se debe refinar el mallado.
20	30	30	Las simulaciones se presentan estables. Se debe bloquear celdas en donde no existirá flujo y refinar el mallado.
20	20	20	Los resultados en bloques 2 y 3 cumplen el rango establecido.
10	10	10	La resolución es mejor. El tiempo de simulación se incrementa. Menor número de errores. Se presenta una simulación estable y que converge.
5	10	10	Se cumple, errores mínimos con buena aproximación en el flujo, simulación lenta, pesada pero estable con pocas notificaciones de error.

Tabla 1. Proceso de refinamiento del mallado.

Las características de la simulación validada se muestran en la Tabla 2.

Bloque	Etapa inicial		Etapa final	
	Modelo sin Calibrar		Modelo Validado	
	Lon. Celdas (m)	N° Celdas #	Lon. Celdas (m)	N° Celdas #
1	0.3	2466855	0.05	13096689
2	0.3	1162957	0.1	7336913
3	0.3	159159	0.1	561939
N° de celdas del dominio	3788971		20995541	
Longitud de la simulación (seg)	200		100	
Tiempo de cálculo de computadora (hs)	15		132	
Requerimiento de Memoria (GV)	47		200	

Tabla 2. Características de las simulaciones.

OBSERVACIONES SOBRE EL MALLADO		
Tamaño de celda (cm)	Ventajas	Desventajas
30	Simulación rápida, ocupa poco espacio de memoria en disco de almacenamiento	Errores de convergencia, poca resolución en post-procesamiento, resultados notoriamente erróneos, goteos en paredes y efecto de escalera en flujo
10	Mejor resolución en mallado inicial, se asegura la convergencia de la simulación, buenos resultados en pos procesamiento y resultados de cálculo	Tiempo de simulación más elevado, requiere más memoria de almacenamiento, sirve solo para geometrías sin secciones variables
5	Mallado se ajusta a la geometría real, buenos resultados numéricos y de post-procesamiento, suficiente para geometría del vertedero en abanico.	Tiempo prolongado de simulación, requiere alta capacidad de procesador y de almacenamiento.

Tabla 3. Ventajas y desventajas del tamaño de celda.

Para el análisis cualitativo se comparara, imágenes del flujo obtenidas como resultado del modelo numérico con fotografías tomadas en el modelo físico. Estas se encuentran recopiladas en la Figura 9.


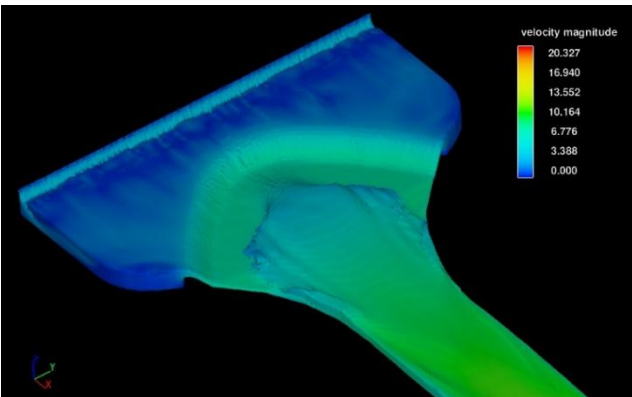

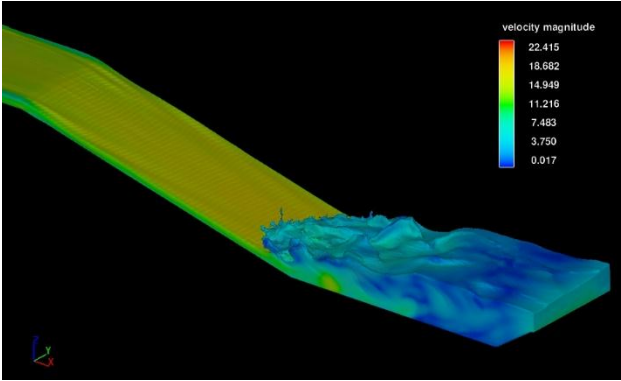

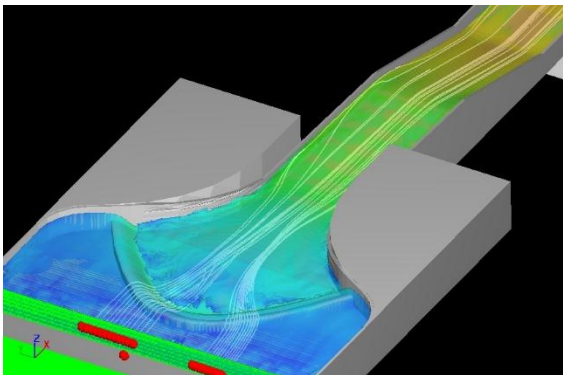
COMPARACION CUALITATIVA DEL FLUJO		
	MODELO FISICO	FLOW-3D
VERTEDERO DE ABANICO		
CUENCO DISIPADOR		
LINEAS DE CORRIENTE		

Figura 9. Comparación cualitativa del flujo a lo largo de la obra.

La comparación entre las imágenes tomadas de los ensayos en modelo físico, con las vistas tridimensionales extraídas de la modelación numérica, reportan una exacta concordancia visual en el flujo a través de la obra. El modelo CFD reproduce correctamente la superficie libre y además las líneas de corriente siguen el mismo patrón de flujo. Esto nos indica que el modelo numérico está bien concebido, concuerda y opera correctamente

Los valores de velocidad obtenidos en cada uno de los modelos se presentan en la Tabla 4.

Modelo Físico		FLOW-3D			
Punto	Velocidad (m/s)	Desviación m/s	Seguridad (%)	Nivel de Significancia α	
1	1	1	0	100	0.00
2	6	6.2	0.21	96.5	0.035
3	11	11.2	0.22	98.03	0.0196
4	15	14.5	-0.50	96.66	0.0333
5	16	15.4	-0.60	96.25	0.0375
6	21	20.2	-0.80	96.19	0.0381
7	6	6.2	0.23	96.16	0.0383

Tabla 4. Validación de velocidades en el modelo numérico.

Los resultados obtenidos de la comparación cualitativa del modelo, y al ser este un proyecto investigativo con un nivel de significancia menor a 0.05 ($\alpha < 0.05$) (Murray Spiegel, 2003) se considera el modelo validado.

3.2. Análisis del flujo en modelo validado

A continuación se muestran las variables representativas para el análisis flujo en la obra sin ninguna estructura de disipación, el mismo que fue utilizado para la validación del modelo.

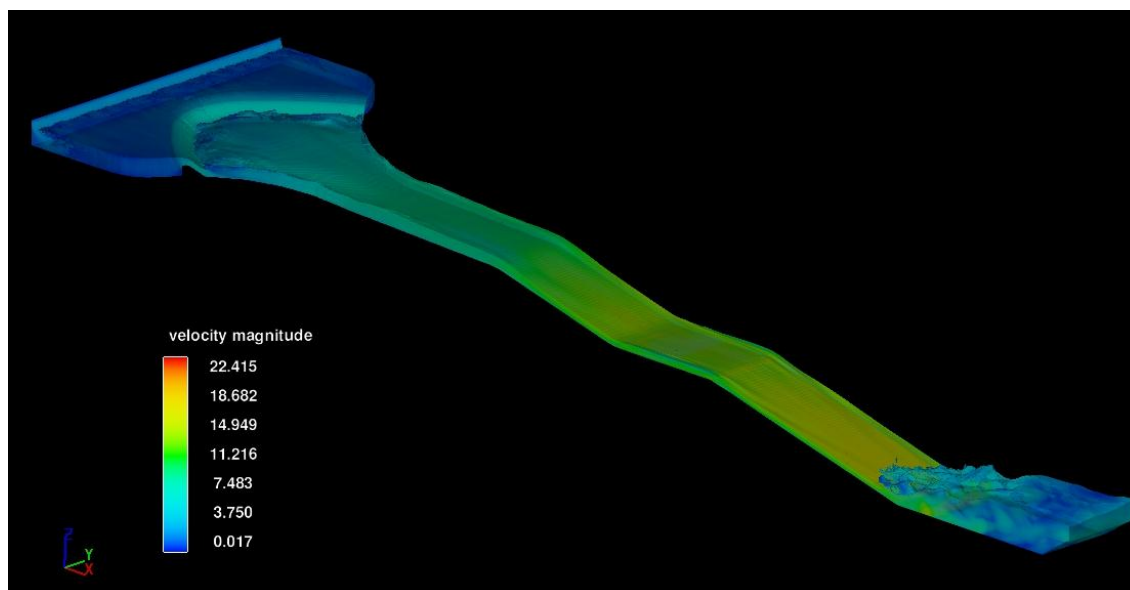


Figura 10. Distribución de velocidades en el vertedero en abanico, rápidas y su cuenco disipador.

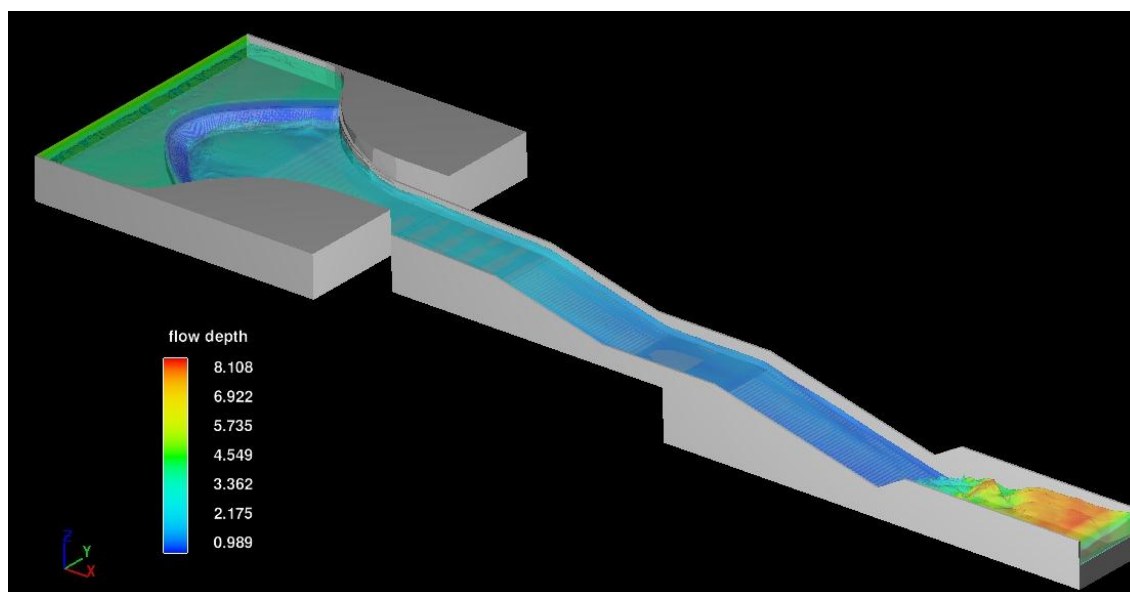


Figura 11. Calados en modelo validado.

La Figura 10 y Figura 11 permiten conocer las velocidades y calados que se producen en la obra. Al inicio se produce un resalto en el cuenco del vertedero, donde se aprecia un incremento del calado cercano a los 2.7 m y velocidades entre los 5.5 m/s y 6 m/s. Conforme el flujo avanza a lo largo de la obra el calado va disminuyendo como consecuencia de la alta energía y velocidad. Al final de la rápida la superficie de agua se inicia con un bajo calado entre 0.5 m y 1 m, y la velocidad entre 20 m/s y 21 m/s.

A la salida del cuenco disipador se identifican velocidades entre los 5 m/s y 6 m/s, y un calado entre 3 m y 4 m. Debido a las altas velocidades de aproximación al cuenco disipador, éste no cumple su acometido y no logra disipar la energía para obtener velocidades moderadas a la salida del cuenco.

3.3.2. Alternativa 2

Technical drawing of a stepped spillway (salto) showing various dimensions and components. The drawing includes a plan view and a side elevation.

Labels:

- Dados amortiguadores
- Bloques de salida
- Umbral terminal
- Talud 2:1
- Talud 1:1

Dimensions and Formulas:

- $0.5 = y_1$
- $0.2 h_3$
- $0.375 h_3$
- $w_1 = y_1$
- $s_1 = y_1$
- $h_1 = y_1$
- $w_2 = 0.5 y_1$
- $w_3 = 0.75 h_3$
- $s_3 = 0.75 h_3$
- $0.8 = y_2$
- h_3
- h_4
- L

Estos datos son implementados en el modelo numérico FLOW-3D como alternativa de análisis de flujo. El detalle constructivo se puede ver en el ANEXO C.

3.4. Análisis de flujo en la alternativa 1

La alternativa 1 consiste en colocar dados disipadores en la tercera rápida, justo antes de la llegada al cuenco disipador, la función de estos dados será reducir la velocidad de ingreso al cuenco.

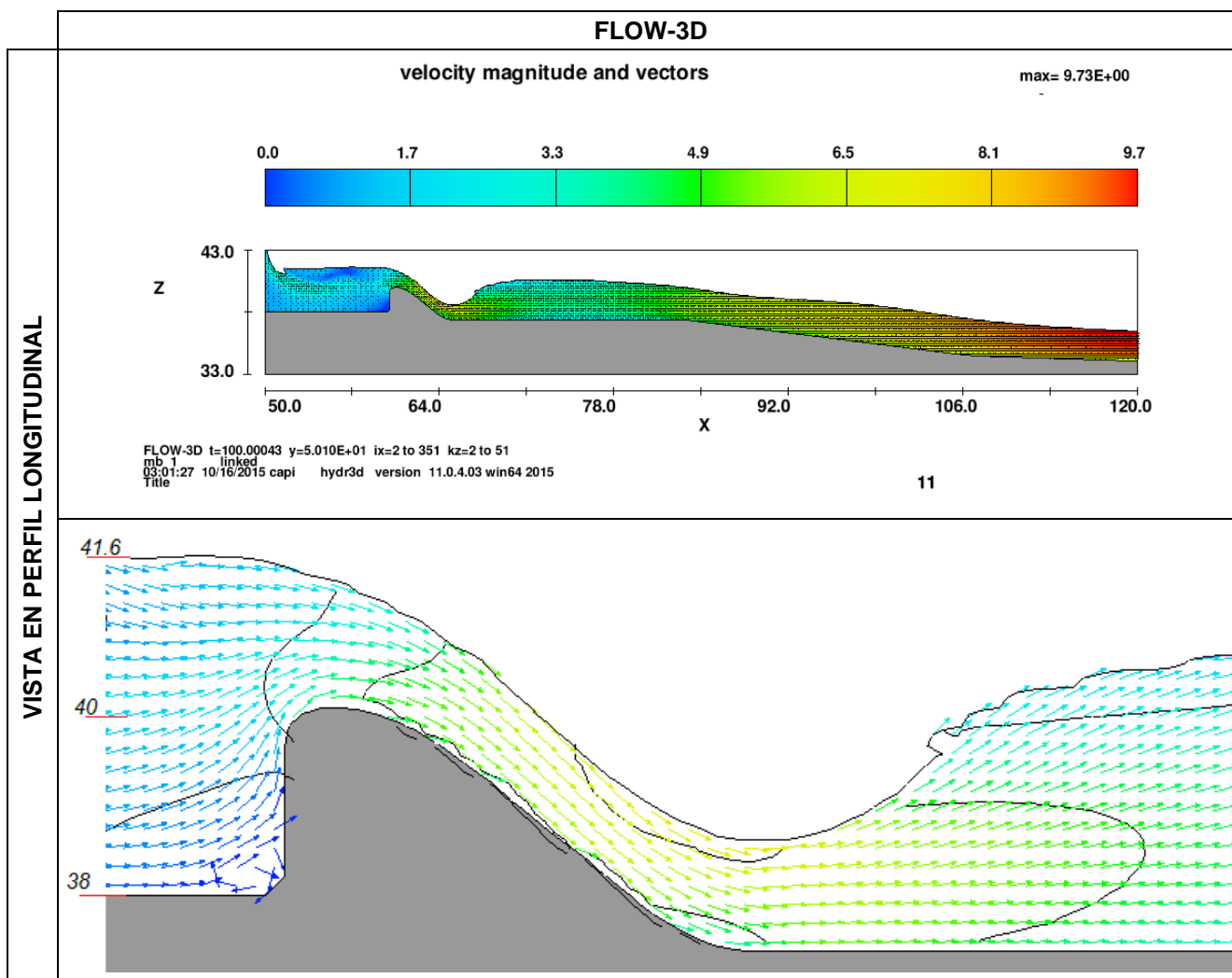


Figura 15. Distribución de velocidades en el bloque 1.

La Figura 15 permite observar la producción de velocidades bajas en la aproximación al vertedero en el orden de 0.01 m/s a 1 m/s. El resalto producido a la salida del vertedero aumenta el calado del agua provocando la pérdida de energía. La velocidad disminuye de 6 m/s al orden de 3.5 m/s. Después del resalto la velocidad se incrementa a un valor de 9.7 m/s a la salida del bloque. En el acercamiento al vertedero se muestran las respectivas cotas de operación de la obra.

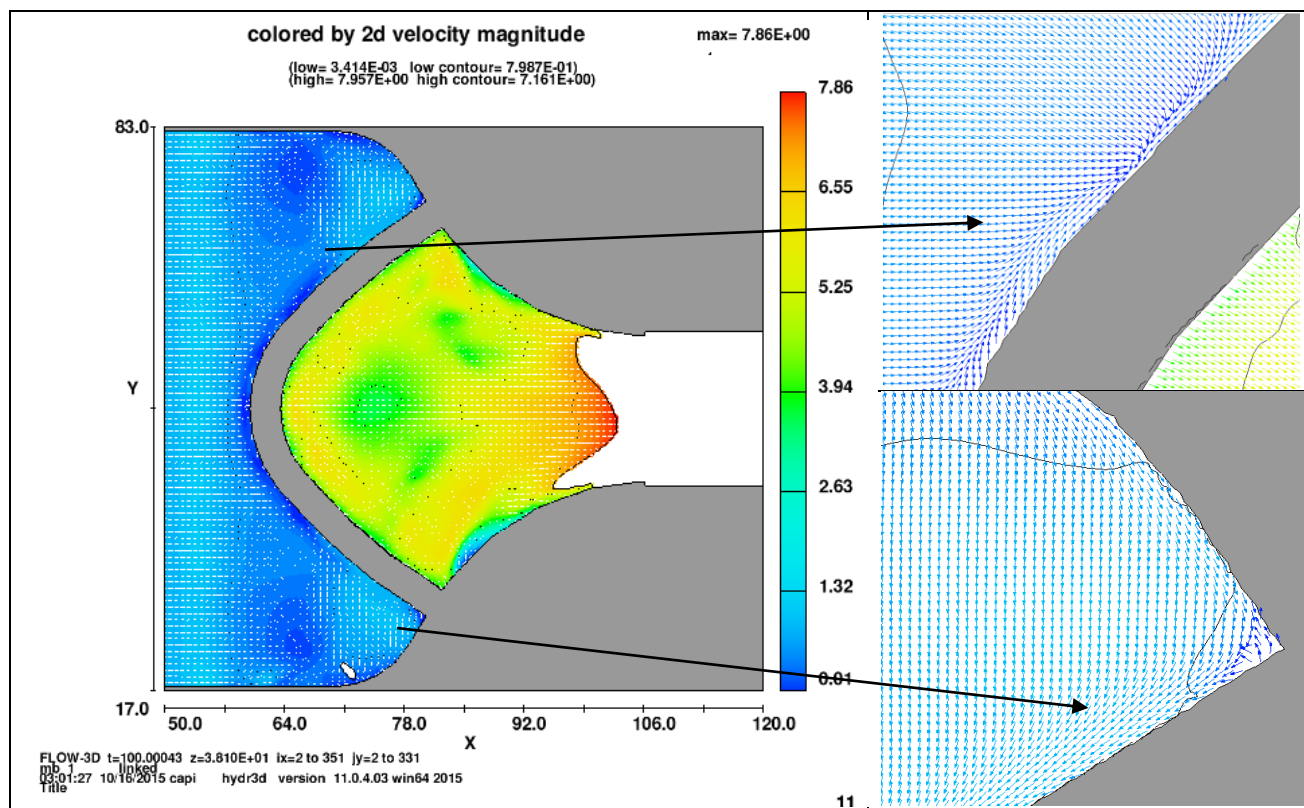


Figura 16. Campo de velocidad en el nivel 38 msnm.

La Figura 16 muestra que en la cercanía al vertedero se producen velocidades bajas en el orden de 0.01 m/s que producen sedimentación. Al acercarse al vertedero las velocidades se incrementan, además los vectores de velocidad se distribuyen de manera uniforme. No se evidencia la existencia de vórtices horizontales ni estancamiento de agua en ninguna zona.

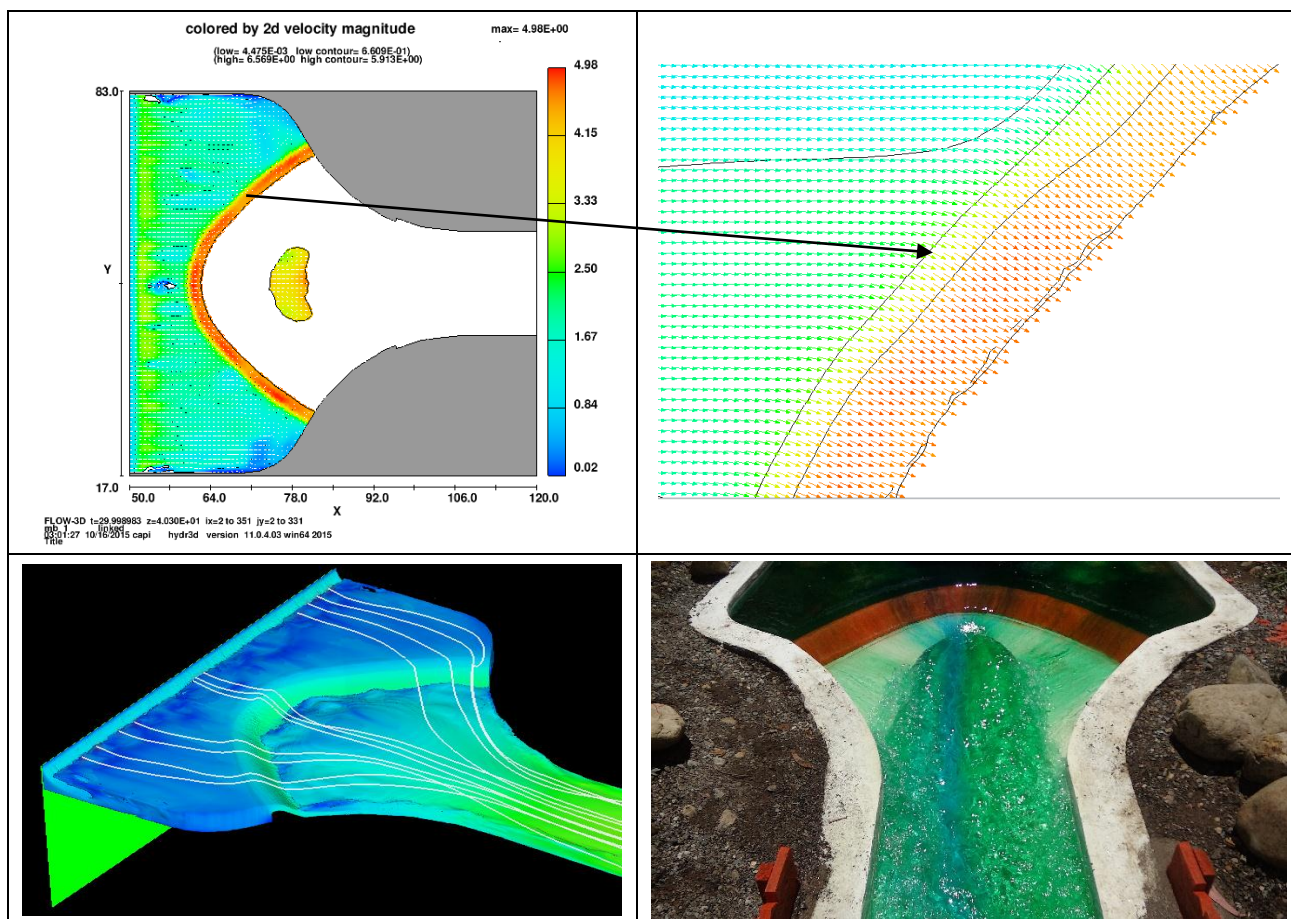


Figura 17. Vectores de velocidad en el nivel 41.6 msnm.

La Figura 17 permite conocer que en esta cota el agua alcanza su mayor altura sobre la cresta del vertedero para un evento de máximo periodo de retorno. Se observa claramente que la velocidad se incrementa conforme el flujo se acerca al vertedero y al pasar sobre la cresta del vertedero se produce un incremento brusco lo que conlleva a una disminución en el calado y a un cambio en el régimen de flujo.

El campo de velocidades presenta un acercamiento de forma ordenada y perpendicular hacia la cresta del azud, después de su paso por el vertedero las líneas de corriente se dirigen al eje central y convergen en un resalto hidráulico. La vista de líneas de corriente en 3D comprueba el acercamiento perpendicular a la obra y la continuidad en el flujo sin presencia de vórtices

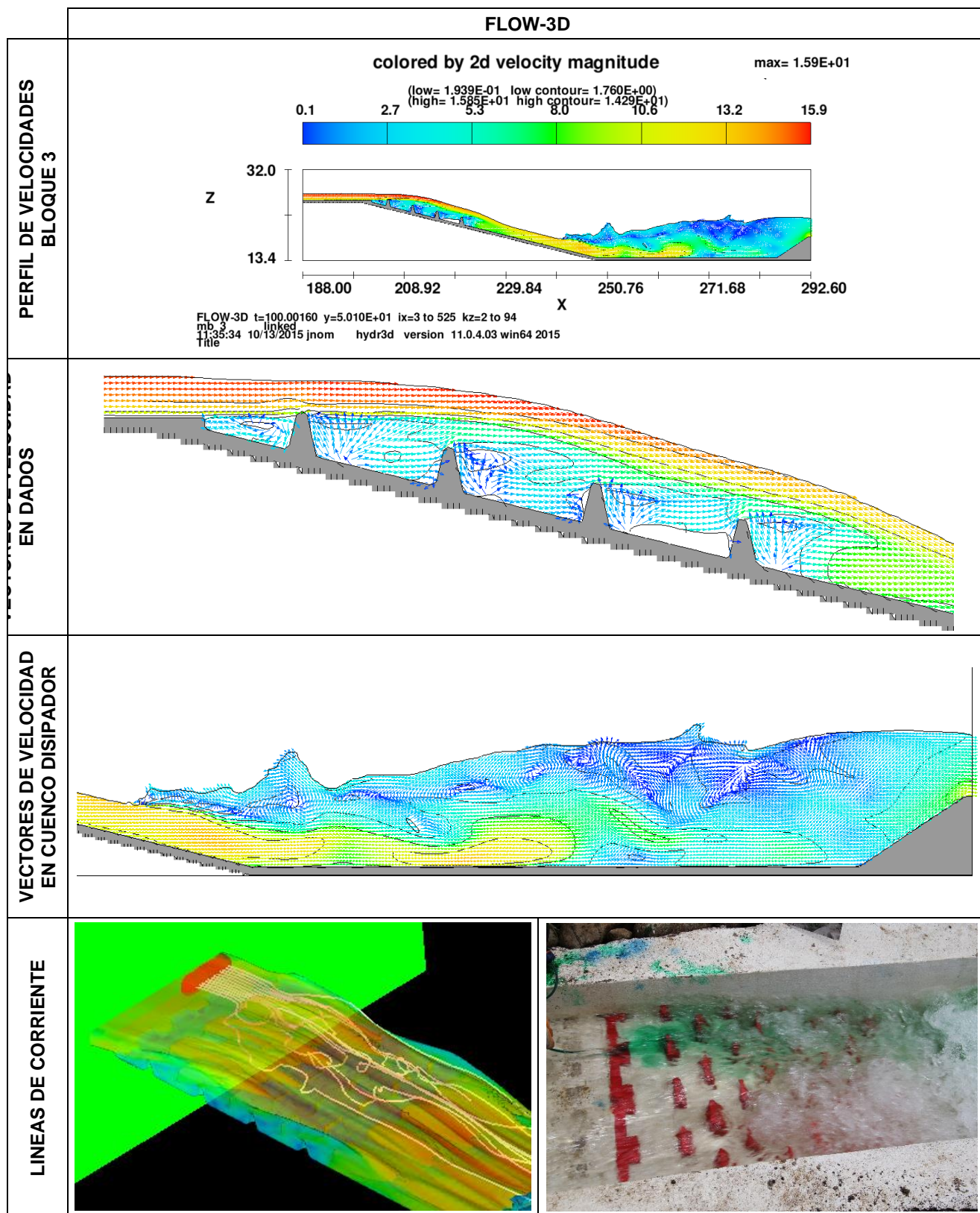


Figura 18. Distribución de velocidades en el bloque 3.

En la Figura 18 se observa que los dados rompen la continuidad del flujo y disminuyen la velocidad a la salida de esta estructura. Adicionalmente provocan vorticidades y zonas de inclusión de aire. El calado se incrementa y la zona por debajo de la altura de los dados existen velocidades muy bajas en el orden de 0.5 m/s a 5 m/s mientras que por encima de estos, la velocidad continua siendo alta en el orden de 13 m/s a 15.9 m/s. Finalmente se producen una velocidad de salida en el orden de 14 m/s a 15.5 m/s.

En la entrada al cuenco se obtienen a velocidades de 15 m/s a 16.5m/s produciendo un resalto bien desarrollado con presencia de entradas de aire, reflujos y vorticidad. En el resalto existe gran pérdida de energía y por consiguiente la disminución en la velocidad de alrededor de 13 m/s a una velocidad de salida en el orden de 3 m/s.

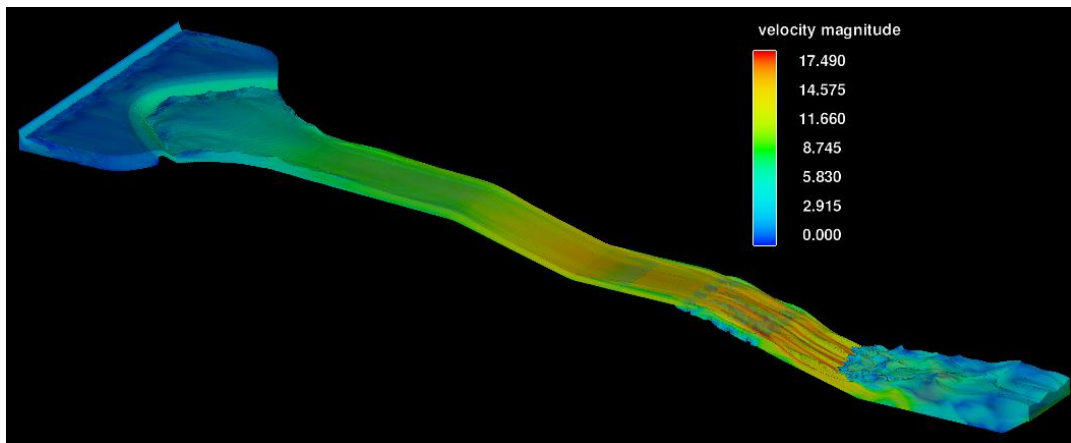


Figura 19. Distribución de velocidades.

Al implementar dados en la rápida previa al cuenco dissipador resulta una disminución significativa en la velocidad de entrada al cuenco, y por consiguiente la disminución de la velocidad en la salida del cuenco resultando un resalto mucho más desarrollado y mayores calados.

Pto de medición	Alternativa 1		
	Velocidad (m/s)	Calado (m)	Froude
Pto. 1	1	3.74	0.36
Pto. 2	6	0.94	2.13
Pto. 3	10.8	2.3	2.42
Pto. 4	15	1.65	3.79
Pto. 5	14.57	1.69	3.73
Pto. 6	16.5	2.27	3.86
Pto. 7	3	3.99	0.8

Tabla 5. Parámetros de interés en la alternativa 1.



En la Tabla 5 se recopilan los parámetros relevantes para cada punto de interés. Estos se encuentran directamente relacionados y deben mostrar concordancia entre sus valores para la aceptación del modelo.

En la aproximación al embalse el calado es alto, con número de Froude bajo y un régimen de flujo subcrítico como consecuencia de su baja pendiente. Cuando el flujo atraviesa el vertedero éste pasa a régimen supercrítico y debido a su gran energía potencial (altura sobre el nivel final de salida) el régimen se mantiene como supercrítico hasta el cuenco disipador. A la salida del cuenco el flujo experimenta el desarrollo de un pequeño resalto en la entrada del canal que luego es sumergido retornando a régimen de flujo subcrítico con velocidad cercana a los 3 m/s.

Adicionalmente se comparan los resultados obtenido del modelo numérico en tres dimensiones FLOW-3D con la evaluación de la alternativa 1 en el modelo unidimensional HEC-RAS (anexo C) obteniendo los resultados mostrados en la Tabla 6.

Punto	FLOW 3D	HEC-RAS			
	Velocidad (m/s)	Desviación m/s	Seguridad (%)	Nivel Significancia α	
1	1				
2	6				
3	10.8	10.5	0.28	97.40	0.03
4	15	15.5	0.53	96.466	0.04
5	14.57	14.6	0.01	99.931	0.00
6	16.5	17.5	1.02	93.81	0.06
7	3	2.8	0.21	93	0.07

Tabla 6. Comparación entre el modelo unidimensional HEC-RAS y el modelo tridimensional FLOW-3D.

Como se observa en la tabla 6 existe una seguridad del 93% permitiéndonos inferir que existe similitud entre los dos modelos con un nivel de significancia entre 0.05 a 0.1. El menor índice de seguridad se ubica en la salida del cuenco disipador y aunque la desviación es baja (0.21 m/s) para un flujo en régimen subcrítico un incremento o disminución de 0.21 m/s podrá significar el arrastre de fondo en un canal de baja pendiente.

Los valores obtenidos en el modelo unidimensional HEC-RAS pese a que fue calibrado con el modelo físico (ANEXO C) presentan un mejor ajuste con los valores del diseño teórico de la obra (PROMAS, 2015b) y presentando variaciones de velocidad en el punto de mayor interés de la obra que es a la salida del cuenco disipador.

3.5. Análisis de flujo en alternativa 2

La alternativa 2 consiste en la implementación de dos filas de dados tipo USBR IV colocados a la salida del vertedero en abanico, el detalle de construcción y diseño se las puede revisar en el ANEXO B.

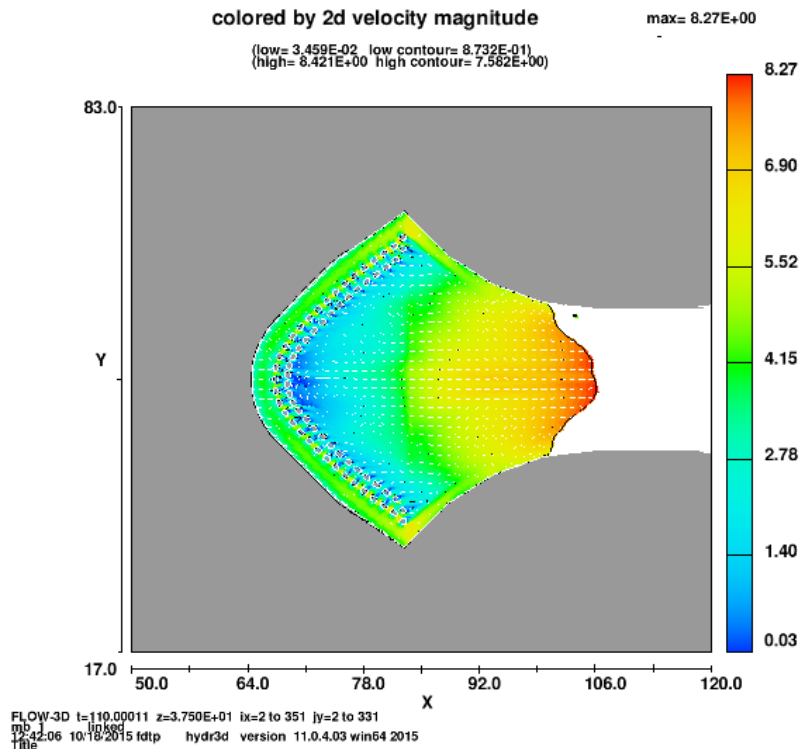


Figura 20. Campo de velocidades en el nivel 38 msnm.

En la Figura 20 se observa que los dados rompen el flujo en la primera parte y producen una disminución severa de la velocidad en la entrada a la primera rápida, al final de la primera rápida el fluido gana una velocidad cercana a los 8 m/s. Los dados cumplen su cometido de producir la pérdida de energía, pero al encontrarse en una cota alta de la obra el agua todavía tiene alta energía potencial que luego se convierten en altas velocidades. Al llegar a la salida del cuenco dissipador, se experimenta una disminución de 0.02 m/s en su velocidad con respecto a la alternativa 1, que no es un valor considerable.

En la Figura 21 se aprecia un resalto sumergido y debido a la configuración de los dados está obligado a desarrollarse en una menor longitud, la altura del resalto inunda los dados llegando hasta el vertedero. Luego de generado el resalto se disminuye la velocidad de salida del vertedero y se encuentra en el orden de 1 m/s; al fin de la segunda fila de los dados el flujo se estabiliza e ingresa a la primera rápida con velocidades cercanas a 3.8 m/s

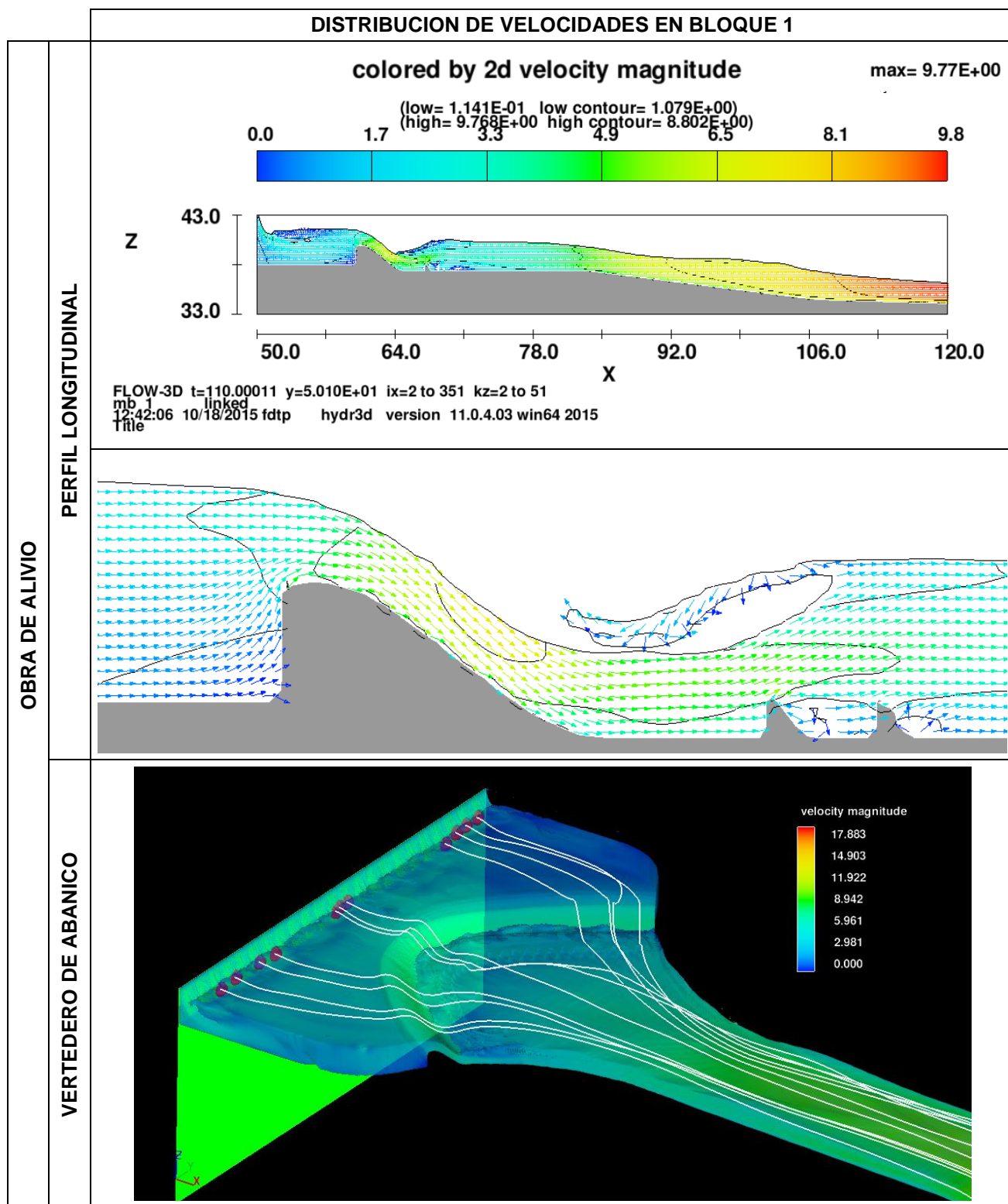


Figura 21. Distribución de velocidades en el bloque 1.

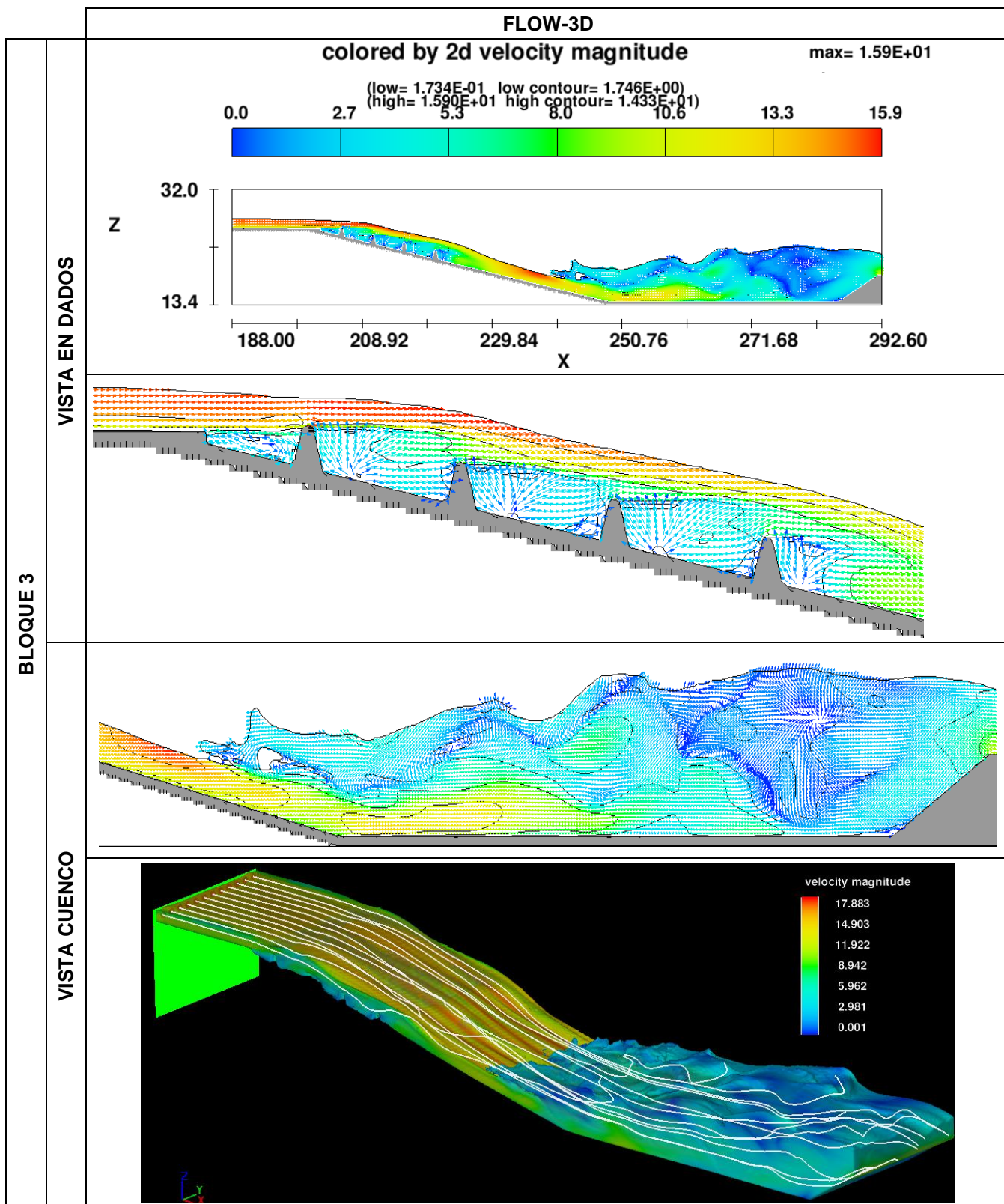


Figura 22. Distribución de velocidades en el bloque 3.

Mediante la Figura 22 se identifica que la velocidad de aproximación al cuenco es alta en el orden de 16 m/s a 16.5 m/s; En el cuenco existe un resalto que disipa bruscamente la energía de entrada y con una velocidad de salida en el orden de 3 m/s.

Sobre los dados las líneas de corriente son casi paralelas y viajan en dirección longitudinal a la obra, por encima de los dados disipadores reportan escasos cruces entre ellas en el plano yx, la turbulencia se genera solamente a la altura de los dados y por debajo de ellos.

En la aproximación al cuenco se presenta un flujo no laminar, con pocos cruces entre las líneas de corriente. En el cuenco disipador las líneas muestran la turbulencia generada por el resalto hidráulico, se notan velocidades bajas y negativas, lo que demuestra que el resalto es sumergido

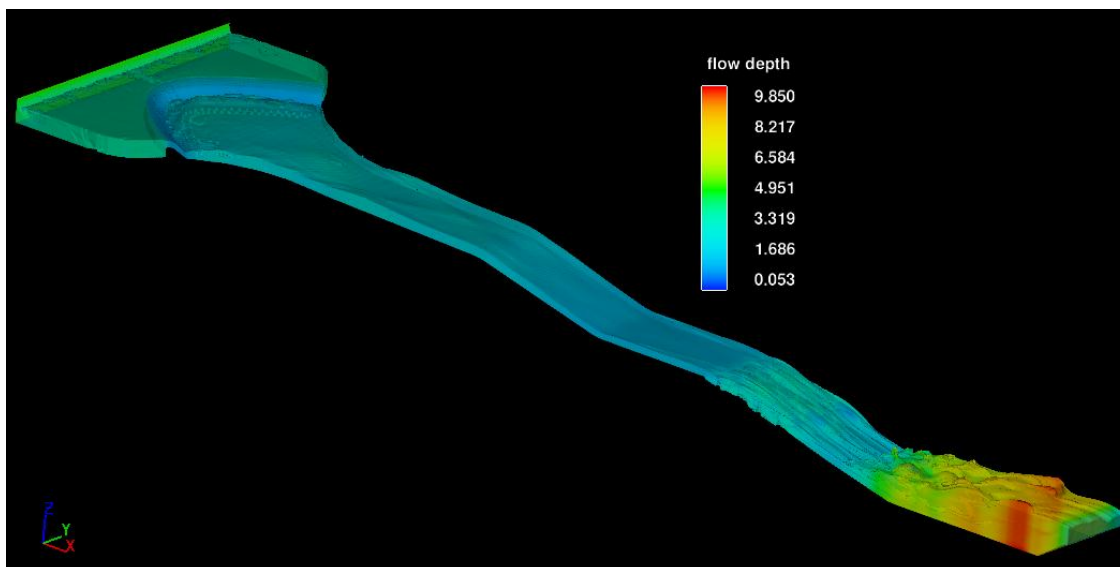


Figura 23. Calados en alternativa 2.

En la Figura 23 se identifican calados en el orden de 3 m a la salida del vertedero en abanico y alrededor de 1.25 m en toda la rápida donde el flujo es supercrítico; alturas máximas de 9.85 m producto del resalto y un calado alrededor de 4 m en la salida del cuenco disipador.

Punto de medición	Alternativa 2		
	Velocidad (m/s)	Calado (m)	Froude
Punto. 1	1	3.75	0.36
Punto. 2	3.6	1.9	1.88
Punto. 3	9.8	2.14	2.45
Punto. 4	14.5	1.56	3.72
Punto. 5	14.8	1.7	3.66
Punto. 6	16.4	1.96	3.86
Punto. 7	2.98	3.85	0.92

Tabla 7. Parámetros de interés en la alternativa 2.

La velocidad de aproximación al vertedero es baja y con iguales valores a la alternativa 1, los dados propuestos cerca de la salida del vertedero cumplen su cometido en el principio de la obra, bajan la velocidad en la salida del cuenco elevando el calado y con menor número de Froude; luego de los dados se produce un resalto que sumerge a los dados, existe pérdida de energía como consecuencia del resalto, pero en el punto 3 al inicio de la segunda rápida el valor de velocidad y calados son similares a los modelos anteriores y con un régimen de flujo supercrítico. A la salida del cuenco dissipador se tiene un flujo subcrítico con una velocidad cercana a los 2.98 m/s, existe una variación mínima con respecto a la alternativa 1.

Punto de medición	Velocidad (m/s)		
	Sin estructuras	Alternativa 1	Alternativa 2
Punto. 1	1	1	1
Punto. 2	6.2	6	3.6
Punto. 3	11.2	10.8	9.8
Punto. 4	15	14.57	14.5
Punto. 5	14.5	15	14.8
Punto. 6	20.2	16.5	16.4
Punto. 7	6.2	3	2.98

Tabla 8. Comparación de la velocidad en la alternativa 1 y 2.

En la Tabla 8 se aprecia las velocidades en los puntos de interés a lo largo de la obra con sus respectivas variaciones. No existe mayor diferencia en cuanto a velocidades en las alternativas, a la salida del cuenco se tienen velocidades por encima de las deseadas.

La alternativa 1 se postula como la mejor en cuanto a disipación energía Vs costo, pero no cumple con los requerimientos de velocidad necesarios. La mayor diferencia entre las alternativas sería la económica, ya que la alternativa 2 requiere más cantidades de obra y por ende mayor costo en su construcción, pero con los mismos resultados, por lo que la propuesta no es viable.



4. CONCLUSIONES

- Se ha implementado el modelo numérico FLOW-3D para el estudio del comportamiento del flujo en el vertedero de abanico y su cuenco disipador.
- Se ha realizado la simulación de los procesos de flujo para el vertedero de abanico y su cuenco, así como la validación de los resultados que fueran obtenidos mediante estudio en modelo físico de escala reducida realizado por el Laboratorio de Hidráulica & Dinámica de Fluidos del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Cuenca.
- La modelización numérica mediante FLOW-3D ha permitido identificar y caracterizar los patrones de flujo desde aguas arriba del vertedero de abanico hasta la salida del cuenco disipador.
- Los patrones de flujo en el modelo numérico son una perfecta reproducción de los resultados reportados por el estudio en modelo físico.
- Mediante el uso del modelo calibrado es posible la implementación de otra alternativa de diseño. Dicha alternativa se permite ser evaluada en un tiempo de acuerdo a la capacidad del ordenador, pero menor que implementar dicha modificación en el modelo físico.
- Se implementó en el modelo numérico FLOW-3D la alternativa de diseño N° 2. Los resultados de la simulación presentan los mismos resultados en los lugares que no se realizó modificaciones.
- La utilización de dados inmediatamente aguas abajo del vertedero no producen un decrecimiento significativo en el valor de la velocidad a la salida del cuenco disipador.
- Los dados propuestos en la alternativa 2 disminuyen la velocidad al inicio de la obra durante en un espacio pequeño sin influir la velocidad de salida.
- El modelo físico retroalimenta el estudio en modelo numérico y viceversa, resultando potentes herramientas para la toma de decisiones.
- La modelación conjunta de una misma geometría con un modelo físico y un modelo numérico resultan satisfactorias, no sólo desde el punto de vista cualitativo sino también desde el punto de vista cuantitativo. Estas permiten verificar una muy buena correlación en los perfiles de la superficie libre relevados y en los campos de velocidades de diferentes secciones.
- Es importante destacar la similitud del modelo físico y numérico, no sólo en el comportamiento general del flujo sino también en detalles como el choque del flujo contra las paredes o contra los dados de disipación.
- Con el uso del modelo tridimensional FLOW-3D se consigue un mejor ajuste que con el modelo unidimensional HEC-RAS con respecto al modelo físico.
- La principal ventaja de usar un modelo CFD es que permite obtener gran cantidad de información para todo el dominio de cálculo.



- El modelo numérico presenta un preprocesador muy potente que elimina la necesidad de realizar toda la simulación para evaluar los sitios donde se necesita refinar el mallado, ya que dependiendo del tamaño de celda utilizado es posible que no reconozca correctamente los detalles de la geometría.



5. RECOMENDACIONES

- La construcción del modelo tridimensional de vertederos debe contemplar una distancia de por lo menos 4 o 5 veces la carga sobre el mismo para que la condición de contorno no se vea influenciada.
- Utilizar una herramienta que permita verificar la correcta construcción de un modelo tridimensional de la estructura hidráulica en estudio.
- En la simulación de estructuras hidráulicas con geometría compleja la primera simulación debe ser llevada a cabo para un tiempo mayor al pronosticado, ya que el modelo numérico FLOW-3D permitirá conocer el tiempo donde el flujo se estabiliza y los resultados no presentan una variación significativa y además reconocer errores en la geometría cuando esta ha sido construida fuera del programa.
- Cuando la geometría presenta una pendiente y genera un desnivel pronunciado, es recomendable la utilización del menor número de objetos “domain remover”, de esta manera se asegura el bloqueo de celdas en donde las ecuaciones no deben presentar solución reduciendo así el número de simulaciones y el tiempo de obtención de resultados válidos.
- El post-procesamiento exhaustivo con FLOW-3D permite la obtención de resultados tanto externos como internos en el análisis del comportamiento del flujo en obras hidráulicas cuya observación y cuantificación de ciertos fenómenos puede resultar muy difícil durante la modelación física, pero cabe destacar que un modelo numérico nunca debe trabajar solo y debe ser complementado aprovechando la potencialidad que cada uno posee.
- El uso de líneas de flujo en el post-procesamiento de resultados del modelo resulta una buena alternativa para la comparación con las imágenes con trazadores capturadas durante la obtención de resultados en modelo físico.
- Los errores que se produzcan en la simulación pueden no ser tomarlos en cuenta siempre y cuando se haya reducido previamente de un número considerable a solo algunos, considerando que son resultado de un proceso iterativo de cálculo en una o dos celdas de entre millones para cada tiempo según el Δt establecido. Además se debe el tiempo que toma corregir estos errores dentro de una simulación.



6. REFERENCIAS

- Bureau of Reclamation, (2007). *Design of small dams*. (U. de Michigan, Ed.) (3rd ed.). USA: U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Reclamation. Retrieved from <https://books.google.com.ec/books?id=KA9SAAAAMAAJ>
- Castilla, R., & Gamez Montero, P. J. (2012). Introducción a la Turbulencia, 1–5. Retrieved from http://projecte-hermes.upc.edu/Enginyeria_Aeroespacial/2B/Mecanica de Fluids/Teoria/Apuntes para imprimir/18. Introducción a la turbulencia.pdf
- Cea Gómez, L. (2005). *An unstructured finite volume model for unsteady turbulent shallow water flow with wet-dry fronts: numerical solver and experimental validation*. Universidad de Coruña. Retrieved from <http://ruc.udc.es/handle/2183/805>
- Dios, M. De, Angulo, M., Blanco, M. Del, & Liscia, S. (2014). Modelación matemática y física de un vertedero modificado, 16. Retrieved from http://www.ina.gov.ar/pdf/ifrrhh/04_019_de_Dios.pdf
- Flow Science, I. (2014). *FLOW-3D User Manual Release 11.0.3* (2014th ed.).
- Jiyuan, T., Guan Heng, Y., & Chaoqun, L. (2007). *Computational Fluid Dynamics: A Practical Approach*. (Butterworth-Heinemann, Ed.). Elsevier Science. Retrieved from <https://books.google.com.ec/books?id=BJwuMQOhM0sC>
- Martínez Nelis, F. M., & Valencia Musalem, A. (2010). Estudio numérico de la fluidodinámica de un estanque de agitación utilizando método de mallas deslizantes, 105. Retrieved from http://repositorio.uchile.cl/tesis/uchile/2010/cf-martinez_fn/html/index-frames.html
- Murray Spiergel, R. (2003). *PROBABILIDAD Y ESTADISTICA*. McGraw Hill Interamericana. Retrieved from <https://books.google.com.ec/books?id=0LowAAAACAAJ>
- Nigro, N., & Storti, M. (2007). *Métodos Numéricos en Fenómenos de Transporte*. <http://doi.org/10.4067/S0071-17132000003500023>
- Ojeda García, A. A., & Tapia Caiza, J. E. (2011). Estudio en Modelo Hidráulico de las Obras del Traslase del Río Daule al Río Vines, 224. Retrieved from <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/4007>
- PROMAS. (2015a). *Resultados obtenidos en Modelo Físico de escala reducida correspondientes al Vertedero en Abanico*.
- PROMAS. (2015b). Servicios de Consultoría para la Elaboración del Plan de Aprovechamiento y Control del Agua en la Provincia de los Ríos., 26, 44.
- Ruiz Coello, M. X., & Narváez Herrera, M. B. (2015). Implementación del programa FLOW-3D para la simulación tridimensional del flujo en una estructura de separación de caudales., 279. Retrieved from http://biblioteca.epn.edu.ec/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=40609&shelfbrowse_itemnumber=56307



Simulaciones y Proyectos. (2015). Flow-3D. Retrieved October 25, 2015, from <http://www.simulacionesyproyectos.com/software/flow3d/#toggle-id-3g>

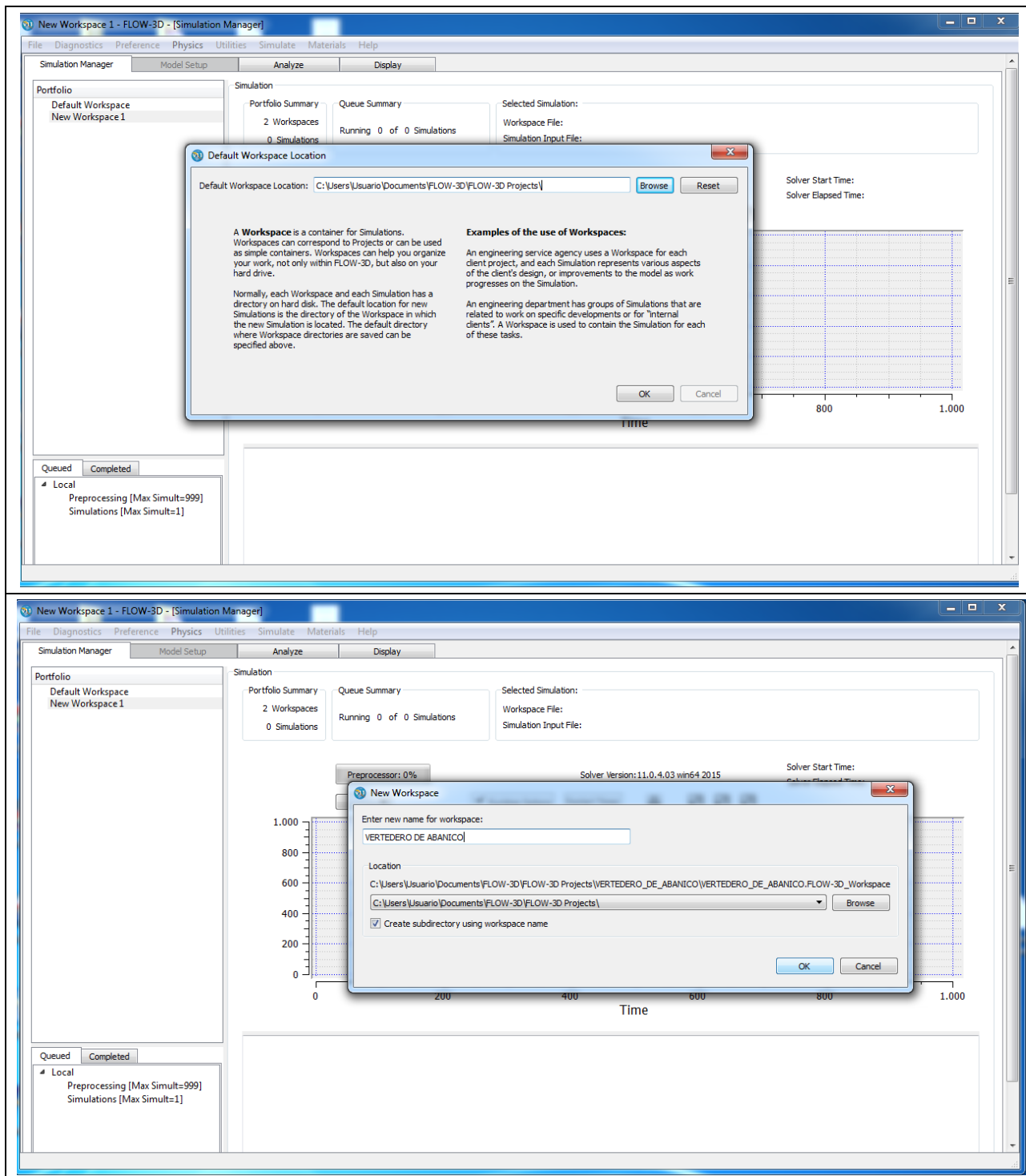
Torres Cámara, R., & Grau Barceló, J. (2007). *Introducción a la mecánica de fluidos y transferencia de calor con COMSOL Multiphysics*. Addlink Software Científico. Retrieved from https://books.google.com.ec/books?id=t99PiP6_K94C



7. ANEXOS

ANEXO A: Parámetros de simulación en el Modelo Numérico FLOW-3D.

A1. Creación de un nuevo espacio de trabajo.





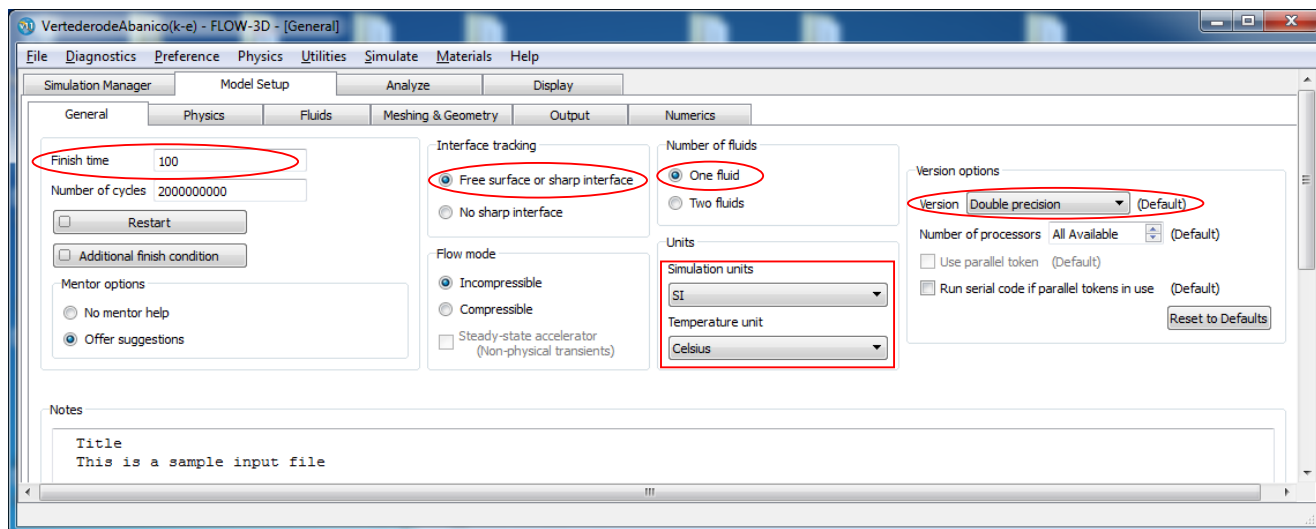
A2. Creación de un archivo de simulación.

The image consists of two screenshots of the ANSYS Fluent software interface, illustrating the steps to create a simulation file.

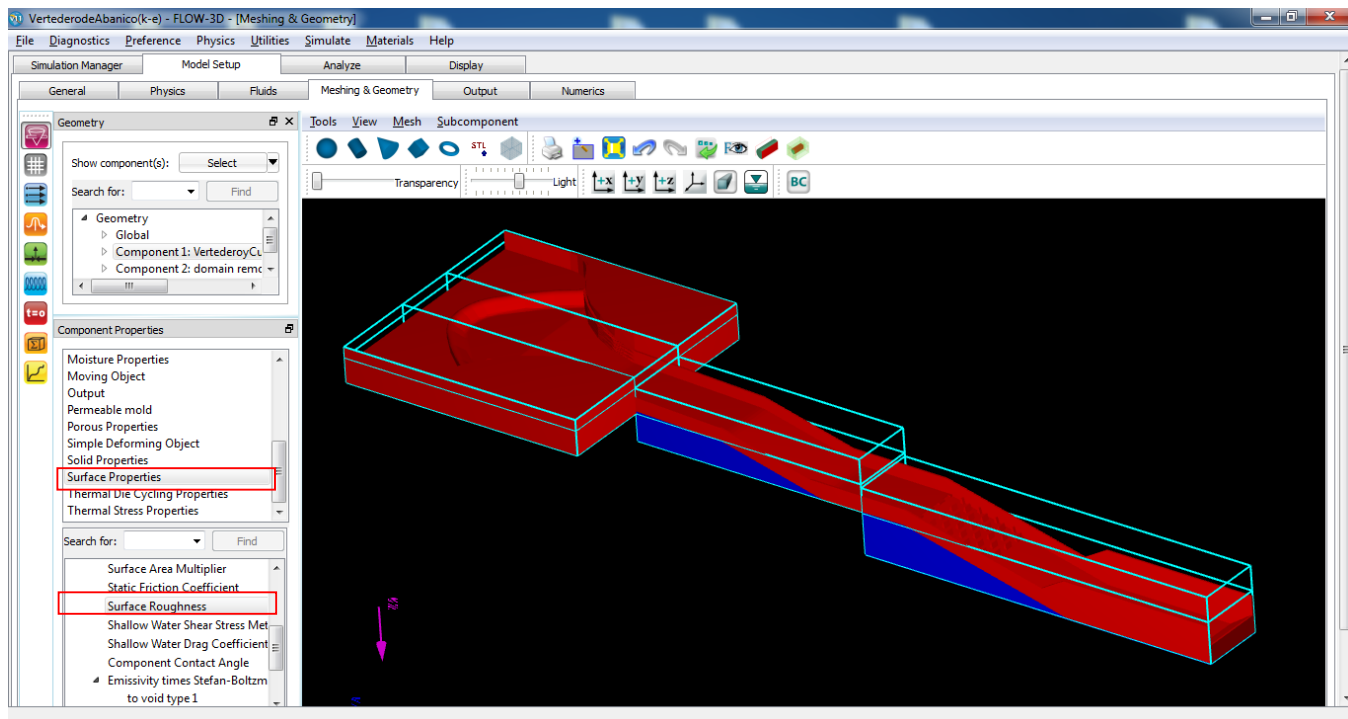
Top Screenshot: The 'Simulate' menu is open, and 'Add New Simulation...' is selected. The 'Portfolio' pane on the left shows 'Default Workspace' and 'VERTEDERO DE ABANICO'. The 'Simulation' pane on the right shows 'Queue Summary' and 'Selected Simulation:'. The 'Preprocessor' status is 0%.

Bottom Screenshot: The 'New Simulation' dialog box is open. The 'Enter new name for simulation:' field contains 'VERTEDERO'. The 'Simulation Template' is 'Default Template'. The 'Path:' field shows 'C:\Users\Usuario\Documents\FLOW-3D\Projects\VERTEDERO_DE_ABANICO\VERTEDERO\prepin.VERTEDERO'. The 'Create subdirectory using simulation name' checkbox is checked. The 'OK' button is highlighted.

A3. Parámetros establecidos para la simulación.

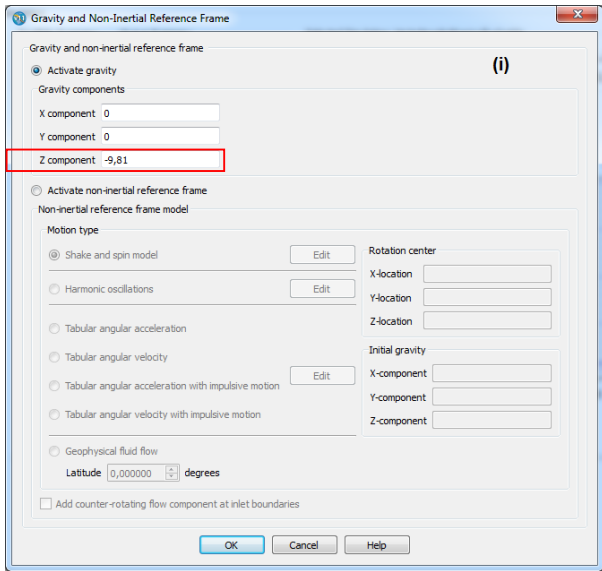


A4. Importación de la geometría y creación del mallado multi-bloque.

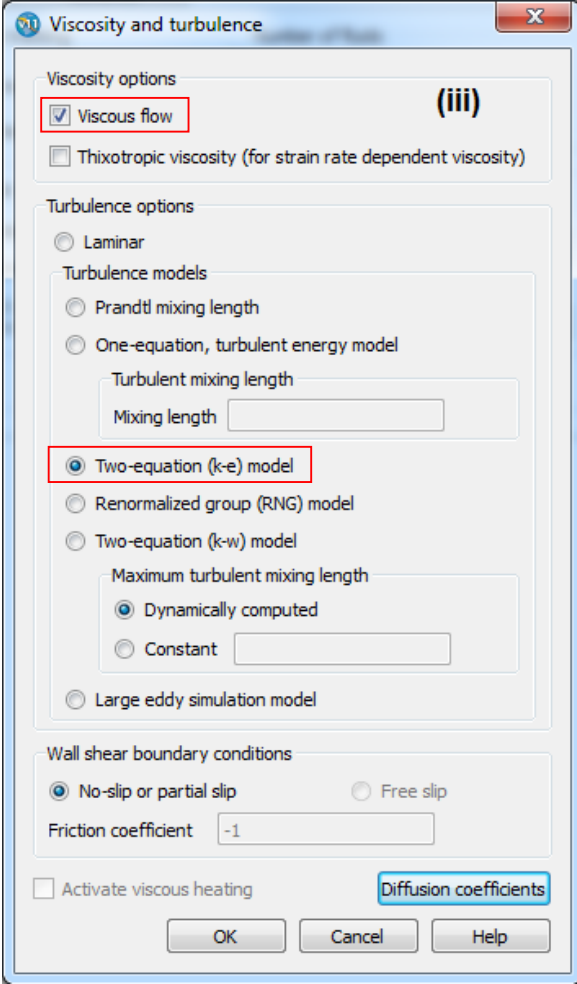


A5. Condiciones de la simulación.

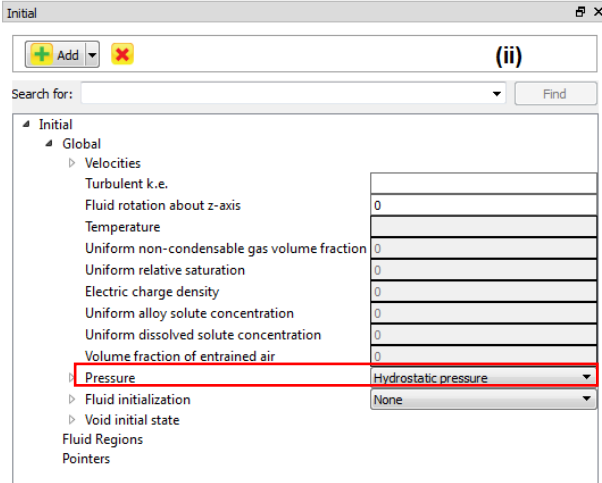
- (i) Definición del valor de la gravedad.
- (ii) Modelo de Turbulencia
- (iii) Presión Hidrostática.



(i)



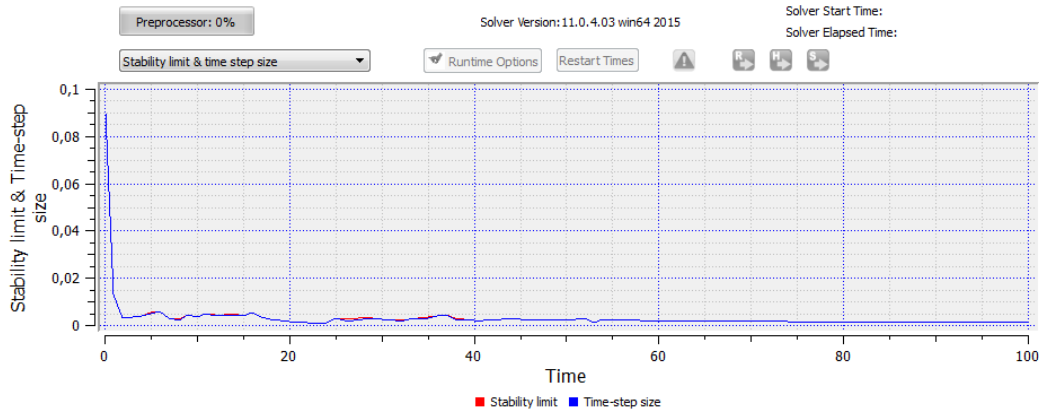
(iii)



(ii)



A6. Comportamiento de la simulación.



A7. Mensajes de alerta durante el proceso de simulación.

Alerta de errores persistentes.

```

Error & Warning Messages

Print Search

===== mentor tip =====
persistent f-packing location at t= 5.91764E+01
x= 8.44004E+01, y= 3.04250E+01, z= 4.26228E+01
i= 231, j= 91, k= 66, mesh block= 1
f= 2.13607E-04
=====
recommend reducing cfpk by factor of 10

===== mentor tip =====
persistent f-packing location at t= 5.92452E+01
x= 8.44004E+01, y= 3.04250E+01, z= 4.26228E+01
i= 231, j= 91, k= 66, mesh block= 1
f= 2.18448E-04
=====
recommend reducing cfpk by factor of 10

===== mentor tip =====
persistent f-packing location at t= 5.93276E+01
x= 8.44004E+01, y= 3.04250E+01, z= 4.26228E+01
i= 231, j= 91, k= 66, mesh block= 1
f= 2.26509E-04
=====
recommend reducing cfpk by factor of 10

===== mentor tip =====
persistent f-packing location at t= 5.93970E+01
x= 8.44004E+01, y= 3.04250E+01, z= 4.26228E+01
i= 231, j= 91, k= 66, mesh block= 1
f= 2.29375E-04
=====
recommend reducing cfpk by factor of 10

===== mentor tip =====
persistent f-packing location at t= 5.94460E+01
x= 8.44004E+01, y= 3.04250E+01, z= 4.26228E+01
i= 231, j= 91, k= 66, mesh block= 1
f= 2.32738E-04
=====
recommend reducing cfpk by factor of 10

===== mentor tip =====
persistent f-packing location at t= 5.96124E+01
x= 8.44004E+01, y= 3.04250E+01, z= 4.26228E+01

```

Alerta de errores con mensaje de convergencia satisfactoria.

```

Error & Warning Messages

Print Search

Solver Messages:
convective flux exceeded stability limit
at t= 3.5852E-01 cycle= 2 iter= 0 delt= 1.7926E-01 mesh block 1
restarting cycle with smaller time step
maximum failure ratio = 2.99572E+00 is in z-coordinate direction
at cell ( 2, 97, 14) mesh block 1

convective flux exceeded stability limit
at t= 1.9394E+00 cycle= 68 iter= 2 delt= 2.2145E-02 mesh block 1
restarting cycle with smaller time step
maximum failure ratio = 1.96878E+00 is in x-coordinate direction
at cell ( 26, 86, 14) mesh block 1

convective flux exceeded stability limit
at t= 3.3249E+00 cycle= 256 iter= 1 delt= 1.3050E-02 mesh block 1
restarting cycle with smaller time step
maximum failure ratio = 1.01205E+00 is in x-coordinate direction
at cell ( 52, 125, 16) mesh block 1

convective flux exceeded stability limit
at t= 3.7456E+00 cycle= 309 iter= 2 delt= 1.2734E-02 mesh block 1
restarting cycle with smaller time step
maximum failure ratio = 1.26804E+00 is in x-coordinate direction
at cell ( 59, 37, 15) mesh block 1

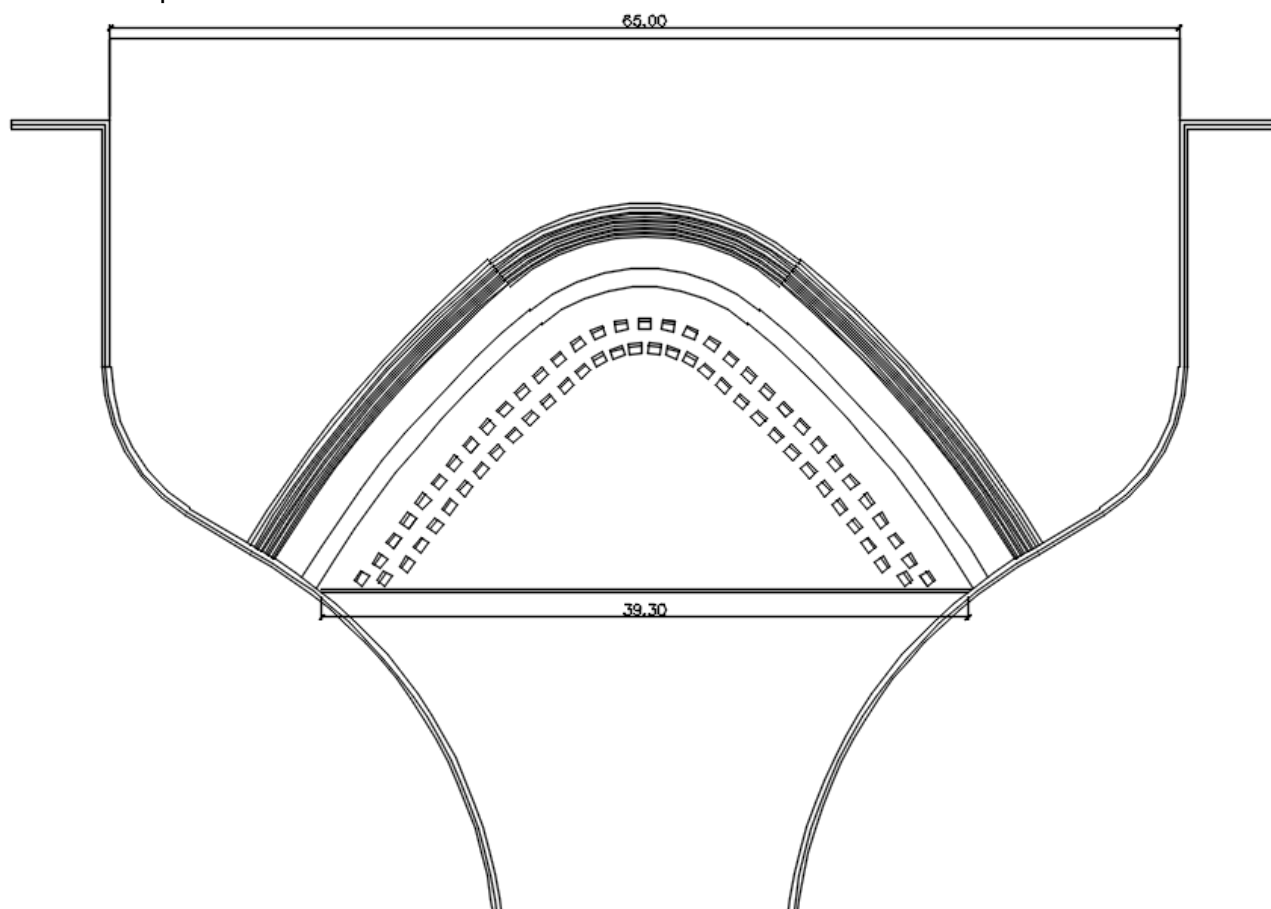
convective flux exceeded stability limit
at t= 1.6395E+01 cycle= 1731 iter= 1 delt= 9.8245E-03 mesh block 3
restarting cycle with smaller time step
maximum failure ratio = 1.09597E+00 is in z-coordinate direction
at cell ( 140, 13, 6) mesh block 3

===== mentor tip =====
solution is nearly steady:
variation from the mean is
less than 5.6928E-01 % at t= 1.07075E+02
=====

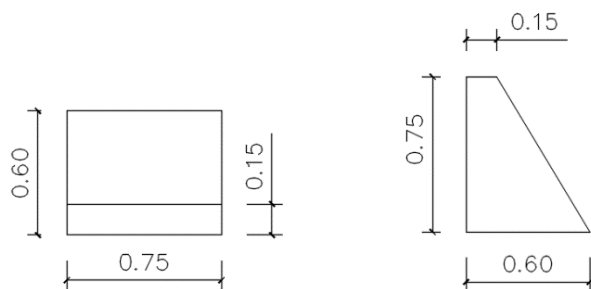
```

ANEXO B: Alternativa 2.

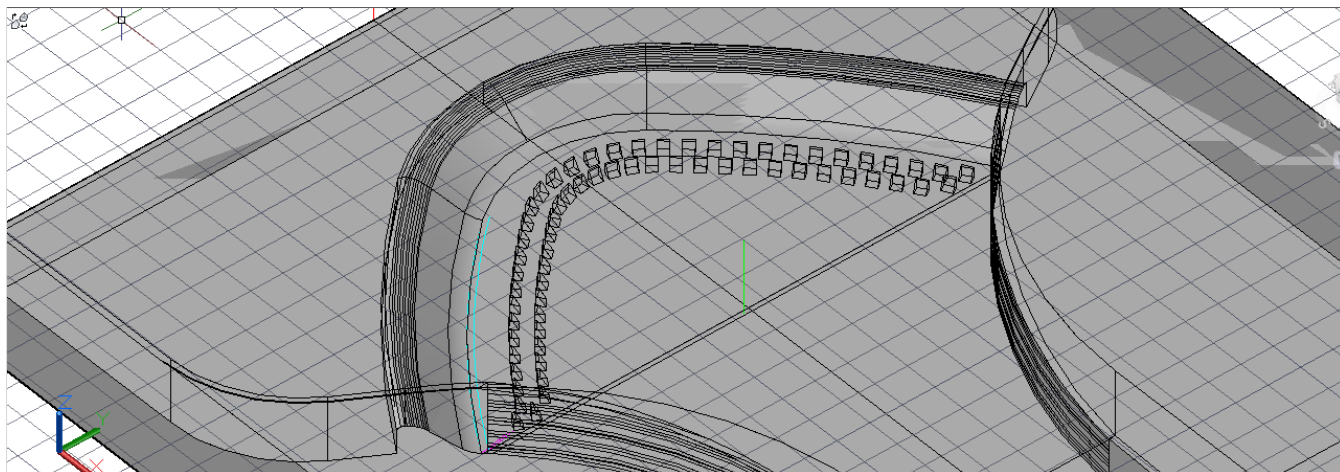
B1. Vista en planta alternativa 2.



B2. Tipo de dados.

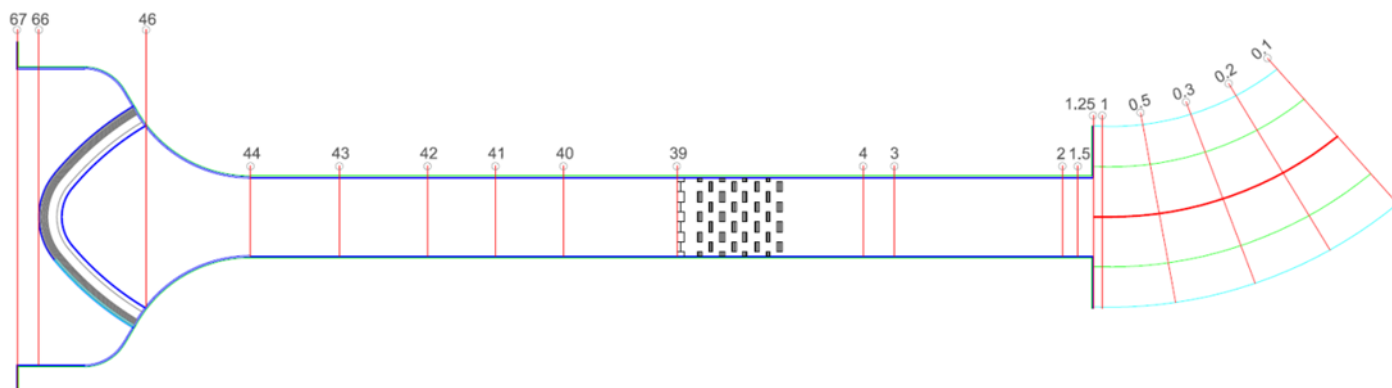


B3. Modelo tridimensional.



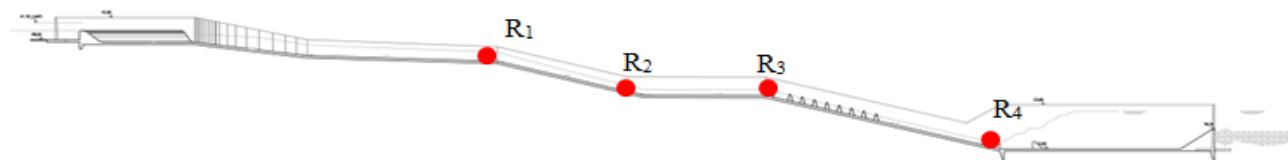
ANEXO C: Resultados finales y conclusiones de las simulación numérica con HEC-RAS para el vertedero de excesos Lechugal 2.

C1. Vertedero Abanico - Alternativa No 1



Vista en planta - Secciones características

En la alternativa No 1 simulada en el modelo físico que ha sido enviada los resultados han salido muy cercanos a los obtenidos con el modelo físico, con esta base el modelo numérico se puede considerar calibrado. En el modelo numérico, adicionalmente aparece un resalto hidráulico secundario aguas abajo del cuenco dissipador (perfil 1,25) el cual es ahogado por el nivel aguas abajo en el canal de restitución. En este punto no se han realizado mediciones en el modelo físico.



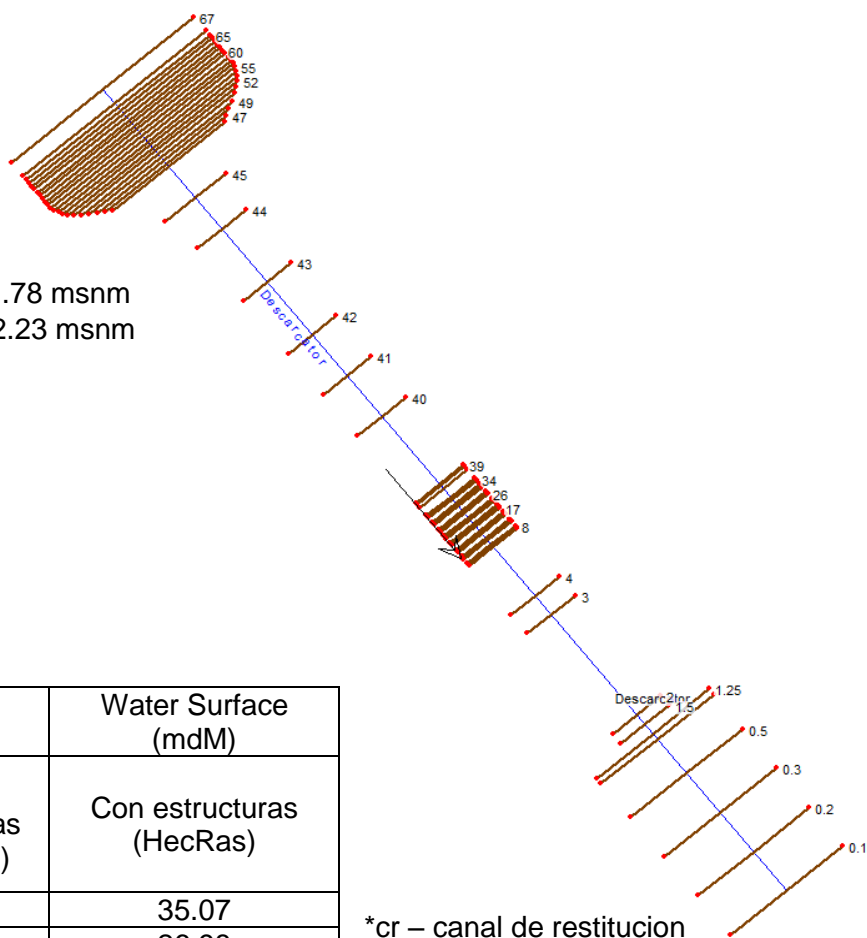
Perfil longitudinal - Secciones características



Alternativa 1: Modelo Fisico

Datos de entrada:

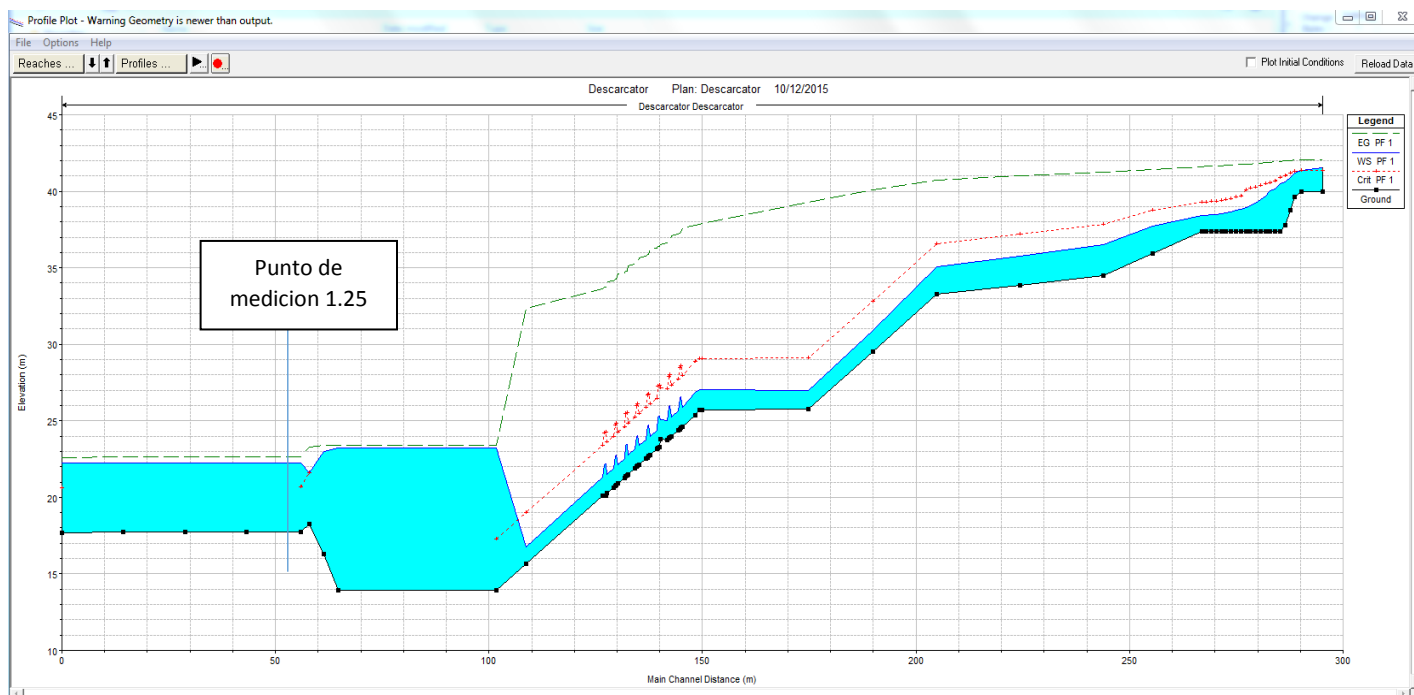
$n_b=0.014$ rugosidad hormigon
 $n_a=0.017$ rugosidad canal
 $Q = 326 \text{ mc/s}$ - caudal de calculo
 Nivel aguas arriba (Seccion 67): 41.78 msnm
 Nivel aguas abajo (Seccion 0.1): 22.23 msnm



Punto de medicion	Velocidad (m/s)		Water Surface (mdM)
	Con estructuras (model fisico)	Con estructuras (HecRas)	Con estructuras (HecRas)
R1(42)	11	10.52	35.07
R2(40)	15	15.53	26.98
R3(39)	16	14.58	27.05
R4(4)	16	17.52	16.73
(1.25)	-	5.74	21.59
*cr	2.4	2.79	22.23

*cr – canal de restitucion

Resultado HecRas:







HEC-RAS Plan: Descargador River: Descargador Reach: Descargador Profile: PF 1

Reach	River Sta	Profile	Q Total (m3/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m2)	Top Width (m)	Froude # Chl
Descargador	67	PF 1	326.00	40.00	41.52	41.37	42.07	0.001297	3.30	98.81	65.00	0.85
Descargador	66	PF 1	326.00	40.00	41.37	41.37	42.05	0.001832	3.67	88.94	65.00	1.00
Descargador	65	PF 1	326.00	39.61	41.20	41.33	42.03	0.002547	4.05	80.41	65.00	1.16
Descargador	64	PF 1	326.00	38.74	40.92	41.20	42.00	0.003872	4.61	70.75	65.00	1.41
Descargador	63	PF 1	326.00	37.78	40.64	41.02	41.97	0.005480	5.12	63.65	65.00	1.65
Descargador	62	PF 1	326.00	37.40	40.48	40.91	41.96	0.006442	5.38	60.55	65.00	1.78
Descargador	61	PF 1	326.00	37.40	40.17	40.68	41.92	0.008488	5.86	55.62	65.00	2.02
Descargador	60	PF 1	326.00	37.40	40.03	40.57	41.90	0.009443	6.06	53.79	65.00	2.13
Descargador	59	PF 1	326.00	37.40	39.71	40.47	41.86	0.003972	6.50	50.19	28.15	1.55
Descargador	58	PF 1	326.00	37.40	39.44	40.37	41.83	0.004890	6.85	47.57	28.87	1.70
Descargador	57	PF 1	326.00	37.40	39.23	40.29	41.81	0.005772	7.11	45.84	29.90	1.83
Descargador	56	PF 1	326.00	37.40	39.07	40.19	41.79	0.006643	7.31	44.61	31.10	1.95
Descargador	55	PF 1	326.00	37.40	38.93	40.12	41.77	0.007483	7.46	43.73	32.41	2.05
Descargador	54	PF 1	326.00	37.40	38.83	39.70	41.75	0.008309	7.57	43.05	33.77	2.14
Descargador	53	PF 1	326.00	37.40	38.73	39.61	41.73	0.009121	7.67	42.51	35.15	2.23
Descargador	52	PF 1	326.00	37.40	38.66	39.53	41.71	0.009917	7.75	42.09	36.54	2.30
Descargador	51	PF 1	326.00	37.40	38.59	39.46	41.69	0.010667	7.81	41.77	37.90	2.37
Descargador	50	PF 1	326.00	37.40	38.53	39.40	41.68	0.011402	7.85	41.51	39.25	2.44
Descargador	49	PF 1	326.00	37.40	38.48	39.35	41.66	0.012107	7.89	41.29	40.57	2.50
Descargador	48	PF 1	326.00	37.40	38.46	39.32	41.64	0.012391	7.91	41.20	40.97	2.52
Descargador	47	PF 1	326.00	37.40	38.44	39.31	41.63	0.012302	7.91	41.21	40.33	2.50
Descargador	46	PF 1	326.00	37.40	38.43	39.29	41.62	0.012533	7.90	41.24	39.90	2.48
Descargador	45	PF 1	326.00	36.95	37.70	38.79	41.44	0.008315	8.57	38.04	21.70	2.07
Descargador	44	PF 1	326.00	34.50	36.49	37.84	41.24	0.009697	9.66	33.75	17.00	2.19
Descargador	43	PF 1	326.00	33.87	35.76	37.21	40.99	0.011219	10.13	32.19	17.00	2.35
Descargador	42	PF 1	326.00	33.25	35.07	36.59	40.71	0.012636	10.52	30.98	17.00	2.49
Descargador	41	PF 1	326.00	29.50	30.93	32.84	40.09	0.026935	13.41	24.31	17.00	3.58
Descargador	40	PF 1	326.00	25.75	26.98	29.09	39.28	0.042800	15.53	20.98	17.00	4.46
Descargador	39	PF 1	326.00	25.73	27.05	29.07	37.87	0.035025	14.58	22.36	17.00	4.06
Descargador	38	PF 1	326.00	25.71	27.03	29.05	37.86	0.035038	14.58	22.36	17.00	4.06
Descargador	37	PF 1	326.00	25.37	26.84	28.88	37.80	0.041553	14.67	22.23	17.00	4.09
Descargador	36	PF 1	326.00	24.62	25.88	27.96	37.61	0.039689	15.17	21.49	17.00	4.31
Descargador	35	PF 1	326.00	24.53	25.55	28.57	37.30	0.060162	14.52	22.45	17.00	4.03
Descargador	34	PF 1	326.00	24.46	25.47	28.49	37.27	0.060479	14.56	22.39	17.00	4.05
Descargador	33	PF 1	326.00	24.38	25.65	27.73	37.18	0.038669	15.04	21.67	17.00	4.25
Descargador	32	PF 1	326.00	24.00	25.26	27.34	37.09	0.040298	15.24	21.39	17.00	4.34
Descargador	31	PF 1	326.00	23.92	25.98	28.01	36.76	0.068421	14.54	22.42	17.00	4.04
Descargador	30	PF 1	326.00	23.84	25.91	27.93	36.73	0.069224	14.58	22.36	17.00	4.06
Descargador	29	PF 1	326.00	23.76	25.03	27.11	36.64	0.039075	15.09	21.60	17.00	4.27
Descargador	28	PF 1	326.00	23.80	25.08	27.14	36.53	0.038256	14.99	21.74	17.00	4.23
Descargador	27	PF 1	326.00	23.30	25.29	27.34	36.42	0.063394	14.78	22.06	17.00	4.14
Descargador	26	PF 1	326.00	23.23	25.22	27.26	36.39	0.063848	14.81	22.01	17.00	4.15
Descargador	25	PF 1	326.00	23.14	24.39	26.49	36.30	0.040688	15.29	21.32	17.00	4.36
Descargador	24	PF 1	326.00	22.76	24.00	26.10	36.21	0.042340	15.48	21.06	17.00	4.44
Descargador	23	PF 1	326.00	22.68	24.72	26.77	35.87	0.072349	14.80	22.03	17.00	4.15
Descargador	22	PF 1	326.00	22.61	24.65	26.69	35.85	0.072832	14.83	21.99	17.00	4.16
Descargador	21	PF 1	326.00	22.52	23.77	25.87	35.75	0.041083	15.34	21.26	17.00	4.38
Descargador	20	PF 1	326.00	22.14	23.38	25.48	35.66	0.042726	15.53	21.00	17.00	4.46
Descargador	19	PF 1	326.00	22.06	24.04	26.10	35.34	0.065028	14.89	21.89	17.00	4.19
Descargador	18	PF 1	326.00	22.00	23.97	26.02	35.32	0.065230	14.92	21.85	17.00	4.20
Descargador	17	PF 1	326.00	21.90	23.15	25.25	35.23	0.041638	15.40	21.17	17.00	4.41
Descargador	16	PF 1	326.00	21.52	22.75	24.86	35.13	0.043288	15.59	20.91	17.00	4.49
Descargador	15	PF 1	326.00	21.44	23.47	25.53	34.80	0.074179	14.91	21.86	17.00	4.20
Descargador	14	PF 1	326.00	21.37	23.40	25.45	34.77	0.074661	14.94	21.82	17.00	4.21
Descargador	13	PF 1	326.00	21.28	22.52	24.63	34.67	0.042021	15.44	21.11	17.00	4.42
Descargador	12	PF 1	326.00	20.90	22.13	24.24	34.58	0.043677	15.63	20.85	17.00	4.51
Descargador	11	PF 1	326.00	20.82	22.79	24.86	34.27	0.066638	15.01	21.72	17.00	4.24
Descargador	10	PF 1	326.00	20.75	22.69	24.75	34.24	0.066091	15.06	21.65	17.00	4.26
Descargador	9	PF 1	326.00	20.65	21.89	24.00	34.15	0.042645	15.52	21.01	17.00	4.46
Descargador	8	PF 1	326.00	20.29	21.51	23.63	34.06	0.044182	15.69	20.78	17.00	4.53
Descargador	7	PF 1	326.00	20.13	22.18	24.25	33.74	0.078606	15.06	21.65	17.00	4.26
Descargador	6	PF 1	326.00	20.13	22.15	24.21	33.72	0.076761	15.07	21.63	17.00	4.26
Descargador	5	PF 1	326.00	20.08	21.31	23.42	33.62	0.042883	15.54	20.97	17.00	4.47
Descargador	4	PF 1	326.00	15.64	16.73	18.98	32.37	0.062650	17.52	18.61	17.00	5.34
Descargador	3	PF 1	326.00	13.95	23.20	17.29	23.42	0.000116	2.07	157.30	17.00	0.22
Descargador	2	PF 1	326.00	13.95	23.20		23.42	0.000116	2.07	157.22	17.00	0.22
Descargador	1.5	PF 1	326.00	16.27	22.98		23.40	0.000275	2.86	114.09	17.00	0.35
Descargador	1.25	PF 1	326.00	18.25	21.59	21.59	23.27	0.002011	5.74	56.80	17.00	1.00
Descargador	1	PF 1	326.00	17.73	22.25	20.69	22.65	0.000487	2.80	115.43	34.55	0.49
Descargador	0.5	PF 1	326.00	17.73	22.23		22.64	0.000495	2.82	115.54	34.31	0.49
Descargador	0.3	PF 1	326.00	17.73	22.23		22.63	0.000491	2.81	115.92	34.34	0.49
Descargador	0.2	PF 1	326.00	17.72	22.23		22.62	0.000476	2.78	117.17	34.43	0.48
Descargador	0.1	PF 1	326.00	17.71	22.23	20.60	22.61	0.000455	2.74	118.97	34.57	0.47

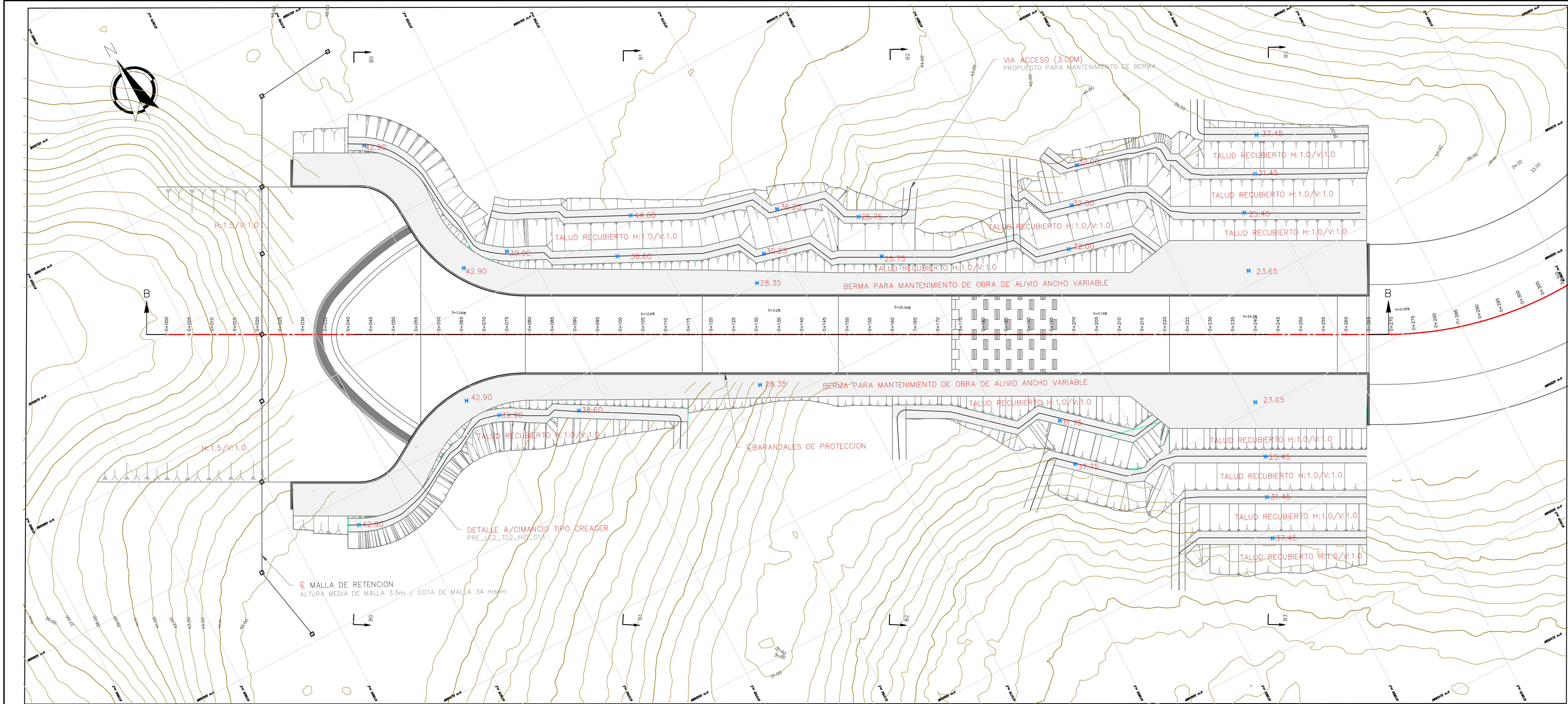


ANEXO D: Planos de Diseño del Vertedero de Abanico, Rápidas y Cuenco disipador.

D1. Emplazamiento Obra de Alivio Presa Lechugal 2.

D2. Planta Vertedero Frontal – Detalle del Creager y del Cuenco Disipador – Detalles muros salida y entrada.

D3. Corte B0-B3 Vertedero – Secciones A-A.

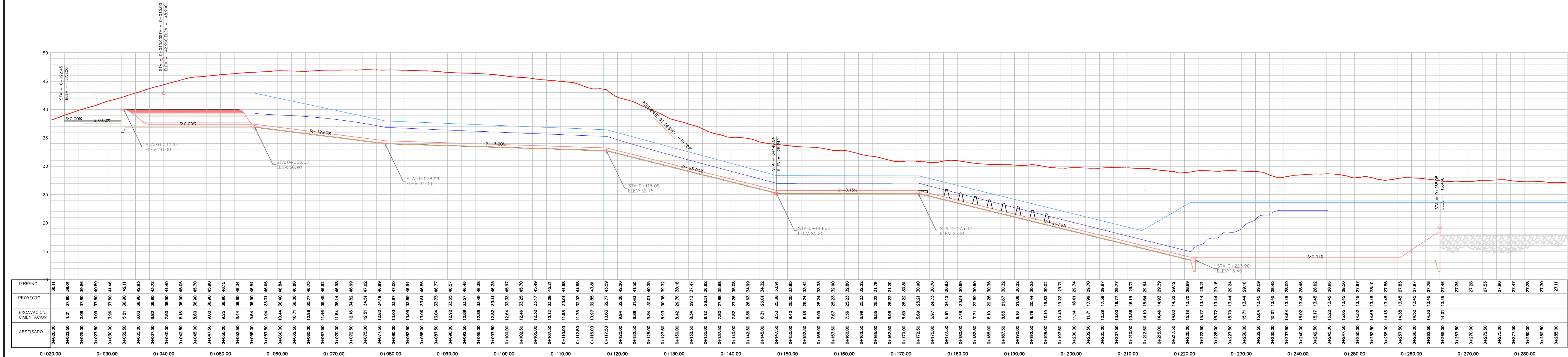


EMPLAZAMIENTO DE OBRA DE ALIVIO
ESCALA 1:500

- SIMBOLOGIA:
-EXCAVACION DE OMENTACION
 -PERFIL DEL PROYECTO
 -CURVAS DE NIVEL PRINCIPALES
 -CURVAS DE NIVEL SECUNDARIAS
 -HIDROGRAFIA
 -VIAS EXISTENTES
 -VIAS PROYECTADAS

- NOTAS:
1. TODAS LAS DIMENSIONES ESTAN EN METROS.
 2. EN CASO DE REQUERIR INFORMACION ADICIONAL A LA EXISTENTE, SE DEBERA COORDINAR CON EL PROYECTISTA.
 3. ANTES DE REALIZAR LA CONSTRUCCION DEL PROYECTO SE DEBERA REVISAR LOS PLANOS Y DOCUMENTOS TECNICOS PARA PRECAUTELAR UNA ADECUADA INTERVENCION Y SE DEBERA SOLICITAR LA AMPLIACION DE LA INFORMACION CORRESPONDIENTE AL PROYECTO.
 4. LAS BERMAS DE LOS CANALES Y RAPIDAS SON DE 4.0m DE ANCHO.
 5. LAS PENDIENTES DE LOS TALUDES PARA LAS BERMAS DE LOS CANALES Y RAPIDAS ES DE H:1.5/V:1.

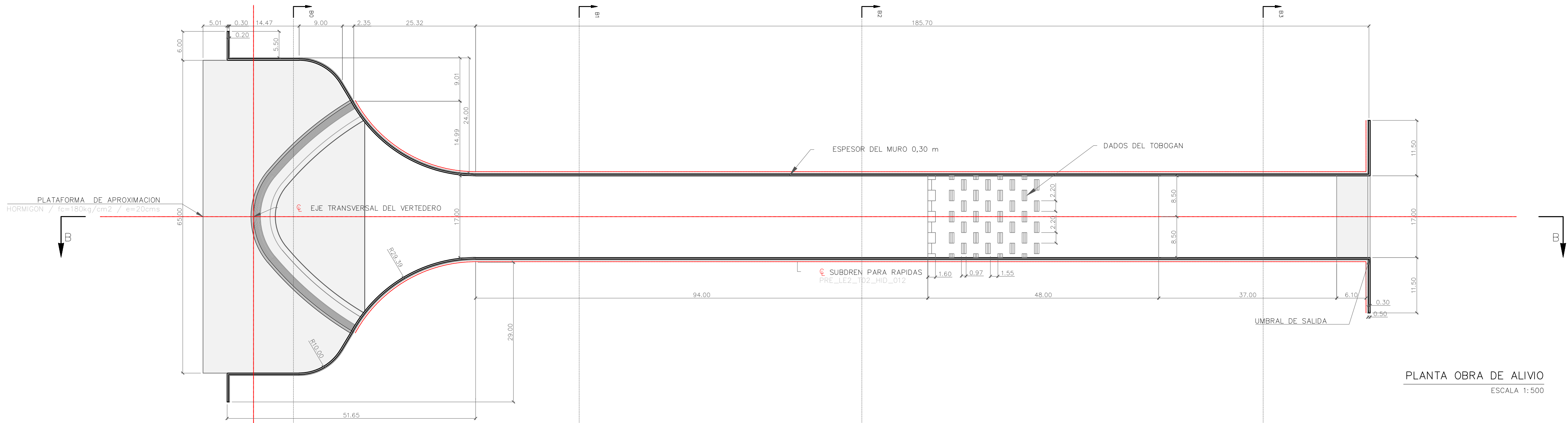
- ESCALAS GRAFICAS:
- ESC. 1:250
- ESC. 1:250
- ELIPSOIDESISTEMA GEODESICO MUNDIAL (WGS) 1984
- CUADRICULAZONA 17 (LINEAS NUMERADAS EN NEGRO)
- PROYECCIONUNIVERSAL TRANSVERSA DE MERCATOR
- DATUM VERTICALNIVEL MEDIO DEL MAR
- DATUM HORIZONTALSISTEMA GEODESICO MUNDIAL (WGS) 1984



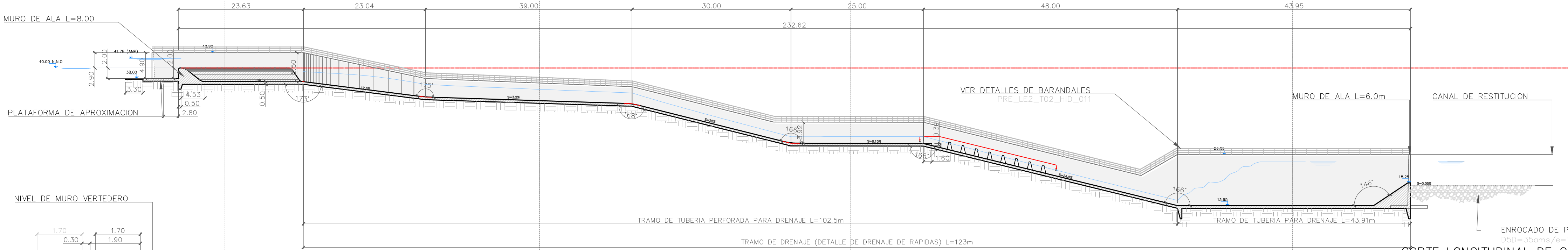
PERFIL OBRA DE ALIVIO (B-B)
ESCALA 1:500

REVISIONES			
N°	Descripción	Fecha	Aprobó

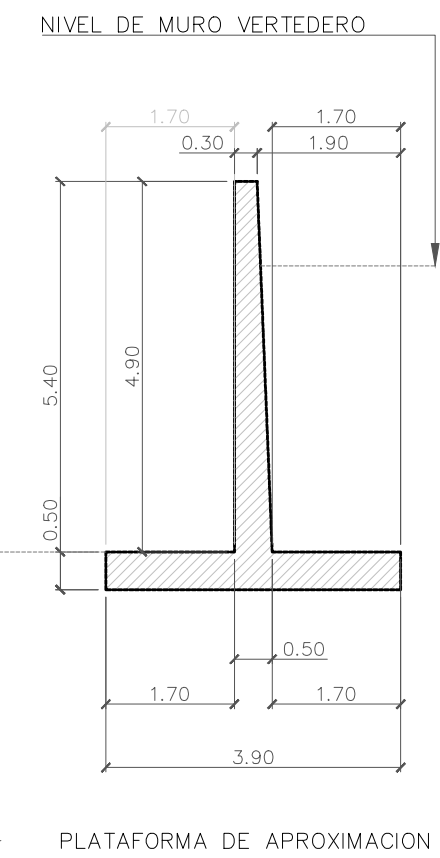
PROYECTO: PLAN DE APROVECHAMIENTO Y CONTROL DE AGUA EN LA PROVINCIA DE LOS RIOS	
CONTIENE: EMPLAZAMIENTO OBRA DE ALIVIO PRESA LECHUGAL 2	
PLANTA OBRA DE ALIVIO	
PERFIL OBRA DE ALIVIO	
EJECUTA:	FISCALIZA:
FECHA: JULIO / 2015	ESCALAS: E.H.: 1:500
DIBUJO: P.R.O.M.A.S.	E.V.: 1:500
ARCHIVO: PRE_LE2_T02_HID_013.dwg	
LAMINA: PRE_LE2_T02_HID_013 /016	
Ing. Felipe Cisneros Ph.D. DIRECTOR DEL PROYECTO:	Ing. Diego Tinoco FISCALIZACION:
ADMINISTRADOR EPA-EP	



PLANTA OBRA DE ALIVIO
ESCALA 1:500

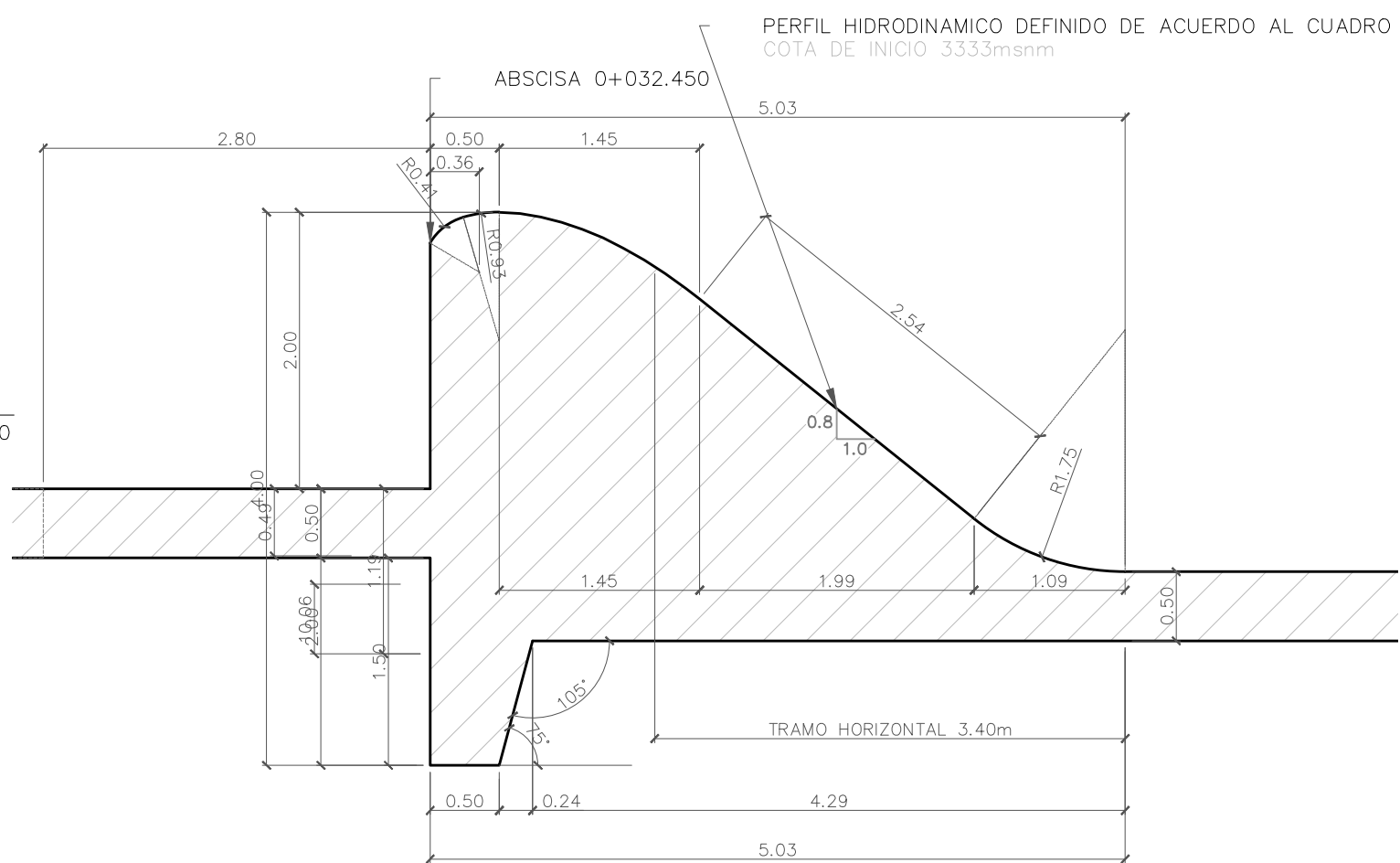


CORTE LONGITUDINAL DE OBRA DE ALIVIO (B-B)
ESCALA 1:500

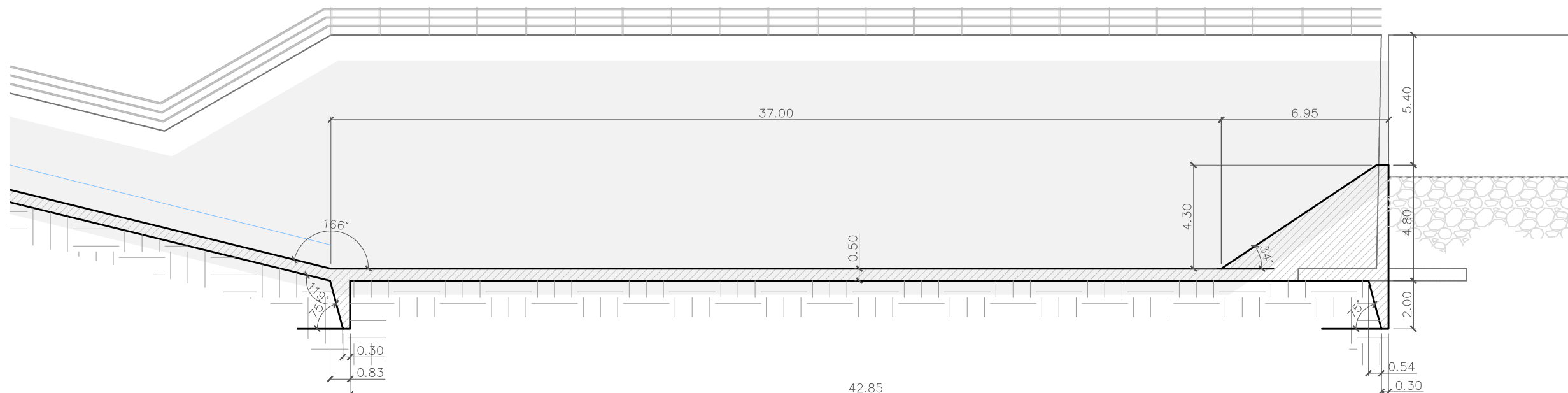


DETALLE MURO DE ALA - ENTRADA
ESCALA 1:100

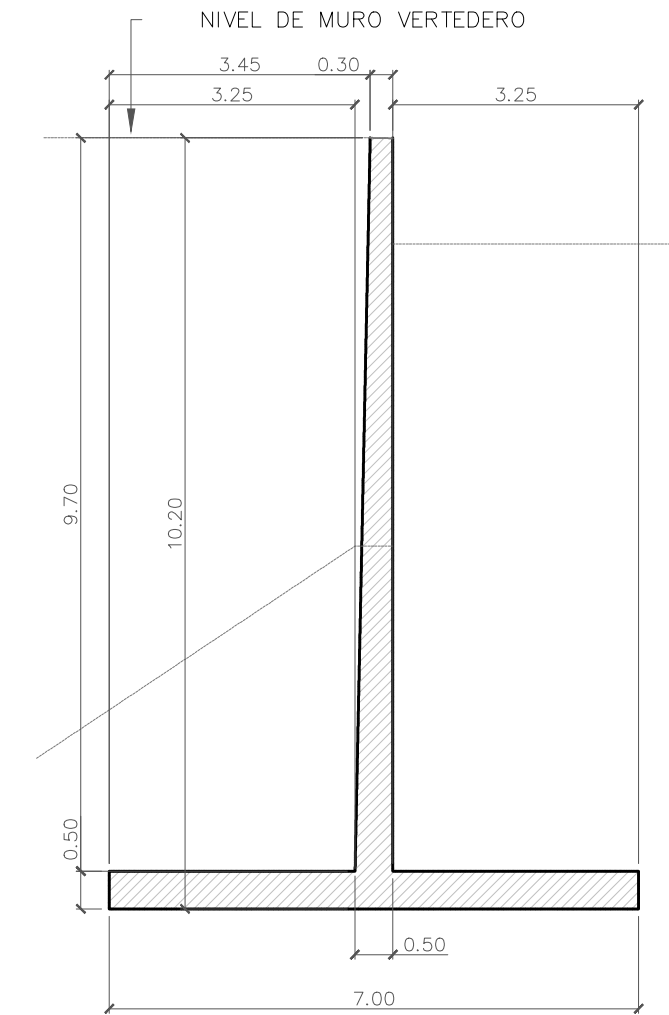
CUADRO DE COORDENADAS DEL
PERFIL HIDRODINAMICO



DETALLE A / CIMANCIO TIPO CREAGER
ESCALA 1:50



DETALLE DEL CUENCO AMORTIGUADOR
ESCALA 1:75



DETALLE MURO DE ALA - SALIDA
ESCALA 1:100

- NOTAS:
1. TODAS LAS DIMENSIONES ESTAN EN METROS.
 2. EN CASO DE REQUERIR INFORMACION ADICIONAL A LA EXISTENTE, SE DEBERA COORDINAR CON EL PROYECTISTA.
 3. ANTES DE REALIZAR LA CONSTRUCCION DEL PROYECTO SE DEBERA REVISAR LOS PLANOS Y DOCUMENTOS TECNICOS PARA PRECAUTELAR UNA ADECUADA INTERVENCION Y SE DEBERA SOLICITAR LA AMPLIACION DE LA INFORMACION CORRESPONDIENTE AL PROYECTO.
 4. LAS BERMAS DE LOS CANALES Y RAPIDAS SON DE 4.0m.
 5. LAS PENDIENTES DE LOS TALUDES PARA LAS BERMAS DE LOS CANALES Y RAPIDAS ES DE H:1.5/V:1.
 6. LA DISPOSICION DE LOS MECINALES EN EL CUENCO CORRESPONDE A UNA MATRIZ DE 2X2 m EN EL ANCHO Y LARGO DEL CUENCO (5.5mX8.9m).
 7. EL MECINAL DEBERA ESTAR RELLENO CON MATERIAL FILTRANTE QUE CUMPLA CON LA SIGUIENTE CONDICION D15/d85<=5, EN EL CUAL D CORRESPONDE AL MATERIAL DEL FILTRO Y d AL MATERIAL DE LA CIMENTACION.
 8. EL SISTEMA DE DRENAJE DE LOS MECINALES LATERALES MANTENDRA LA CONFIGURACION DEL MATERIAL FILTRANTE IMPLEMENTADO EN LAS RAPIDAS DEL VERTEDERO.



ELIPSOIDESISTEMA GEODESICO MUNDIAL (WGS) 1984
CUADRICULA ZONA 17 (LINEAS NUMERADAS EN NEGRO)
PROYECCIONUNIVERSAL TRANSVERSA DE MERCATOR
DATUM VERTICALNIVEL MEDIO DEL MAR
DATUM HORIZONTALSISTEMA GEODESICO MUNDIAL (WGS) 1984

REVISIONES			
N°	Descripción	Fecha	Aprobó



PROYECTO: PLAN DE APROVECHAMIENTO Y CONTROL DE AGUA EN LA PROVINCIA DE LOS RIOS

CONTIENE:

PLANTA VERTEDERO FRONTAL

DETALLE DEL CREAGER Y DEL CUENCO DISIPADOR

DETALLES MUROS SALIDA Y ENTRADA

EJECUTA:  FISCALIZA: 

FECHA: ENERO / 2015 ESCALAS: E.H.: VARIAS

DIBUJO: P.R.O.M.A.S. E.V.: VARIAS

ARCHIVO: PRE_LE2_T02_JHD_008-9.dwg

LAMINA: PRE_LE2_T02_JHD_008 /009



Ing. Felipe Cisneros P.K.D.
DIRECTOR DEL PROYECTO:

Ing. Diego Tinoco
FISCALIZACION:

ADMINISTRADOR EPA-EP:

